

Telmo Miguel Pereira Paula Reis Silva

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

**Optimização da influência do ângulo de contacto
na injectabilidade de grouts**



Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques,
Professor Catedrático, FCT-UNL

Co-Orientador: Doutor Fernando Jorge Fernandes Jorne,
FCT-UNL

Presidente: Prof. Doutor Rodrigo M. Gonçalves

Arguente: Prof. Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar

Vogal: Prof. Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques

Dezembro de 2016

‘Copyright’ Telmo Miguel Pereira Paula Reis Silva, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor Fernando Henriques pela oportunidade que me concedeu de realizar a minha dissertação como seu orientando, bem como por todos os ensinamentos que me transmitiu ao longo desta jornada, sem os quais, certamente, todo o meu trabalho não seria tão proveitoso.

Em segundo lugar gostaria igualmente de agradecer ao Doutor Fernando Jorne pela disponibilidade e colaboração que sempre demonstrou e, bem assim, pelo incentivo, partilha de conhecimentos, opiniões e críticas com que sempre pautou o meu acompanhamento durante dissertação, quer ao nível prático quer na vertente teórica.

Um obrigado também ao Engenheiro Vítor Silva por todo o apoio dado no Laboratório onde a sua experiência e conhecimento foram bastante valiosos para superar os mais variados desafios.

Quero também agradecer aos meus colegas, em especial ao Eduardo Neno, Frederico Telha e Bernardo Romão por toda a força e ajuda que sempre me deram, sendo certo que, sem eles, o tempo passado nesta instituição não teria sido o mesmo.

Um especial agradecimento à minha família, aos meus Pais e Avós, por todo o apoio e confiança que sempre depositaram em mim ao longo de todo o meu percurso académico, bem como ao meu irmão e à minha namorada.

Por fim e o mais importante, um especial muito obrigado ao meu Avô, José Maria Rodrigues Paula, pela pessoa que foi, pelos valores, princípios, experiência de vida e ensinamentos que me transmitiu, bem como, por todo o apoio incondicional com que sempre pautou o acompanhamento do meu crescimento durante a sua vida.

Preâmbulo

A presente dissertação foi elaborada no âmbito do projecto de investigação Optimização de caldas para consolidação de alvenarias (PTDC/ECM/104376/2008) financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia do Ministério da Educação e Ciência, integrando-se no trabalho desenvolvido pela equipa de investigação coordenada pelo orientador desta dissertação, à qual o autor se juntou no período em que a esteve a preparar. Por essa razão a dissertação usa metodologias e conhecimentos desenvolvidos anteriormente no desenrolar do projecto e que em alguns casos não foram ainda publicados ou aguardam aceitação nas revistas a que foram submetidos.

Os diferentes horizontes temporais em que se desenvolvem as várias acções que integram o projecto, designadamente as teses de doutoramento em curso, as dissertações de mestrado já terminadas e a conclusão do próprio projecto, levam a que esta situação de utilização de conhecimentos, metodologias e informação ainda não publicados não seja condicionada, sob pena de inviabilizar a conclusão dos trabalhos cujo âmbito ou duração sejam mais reduzidos. Daí decorre que muita informação não publicada utilizada nesta dissertação seja propriedade intelectual de membros individuais da equipa ou da equipa de investigação em geral. Para clarificação do assunto e para além desta nota, foi utilizada a figura da comunicação particular para referenciar alguma dessa informação, sem prejuízo de existirem situações que possam não estar totalmente identificadas.

Resumo

Presentemente é notável o envelhecimento do património edificado, principalmente ao nível de monumentos e edifícios antigos, bem como a crescente preocupação e necessidade de intervenções de reabilitação por forma a otimizar as condições de habitabilidade, segurança e conforto. Na verdade, grande parte destas edificações é constituída por alvenarias de pedra heterogéneas, as quais, devido à falta de manutenção periódica e com o decorrer dos anos, originam limitações a nível estrutural. Nessa conformidade, torna-se imperioso proceder a intervenções de consolidação com vista a devolver a segurança necessária à estrutura. Para esse efeito são várias as técnicas existentes, entre as quais, o encamisamento, rebocos armados, injeção de grouts, entre outras.

O presente estudo irá focar-se na injeção de grouts com o intuito de restabelecer a compacidade, mediante o preenchimento dos vazios existentes na alvenaria. Desta forma, conseguir-se-á, não só, obter um aumento da resistência mecânica, como igualmente, contribuir para a uniformidade de tensões e para a continuidade dos diferentes panos de alvenaria antiga, tendo como objectivo final o incremento do comportamento monolítico da parede. Com a utilização desta técnica existe uma igual preocupação no que diz respeito à compatibilidade do grout injectado face aos materiais constituintes da alvenaria. O grout utilizado no estudo foi feito à base de cal hidráulica tendo em conta as características químicas, físicas e mecânicas dos materiais que constituem as alvenarias antigas. A escolha do grout tem como principais finalidades a sua injectabilidade e durabilidade, para que se consiga o melhor desempenho possível.

É igualmente necessário estudar o meio poroso, uma vez que após o grout ser injectado, este vai perdendo as suas propriedades devido à absorção de água por parte deste. Este fenómeno origina problemas de penetração do grout e, consequentemente, futuros problemas estruturais pela má aplicação da técnica. Existe portanto a necessidade de diminuir esse efeito de sucção da água constituinte do grout por parte do meio poroso. Sabe-se que através da adição de um hidrófugo de superfície, é possível alterar o ângulo de contacto entre o grout e o meio poroso. Uma das maneiras de o fazer é por exemplo adicionar silicone visto este diminuir o efeito de sucção da água.

O presente estudo centra-se no modo de aplicação do silicone com vista à alteração do ângulo de contacto, bem como, nas repercussões que este origina ao nível da injectabilidade e resistências mecânicas. No âmbito do seu estudo foi avaliado um factor diferenciador da injeção na injectabilidade do grout, que consistia numa pré-injeção de uma solução de silicone no meio poroso.

De forma a aprofundar os conhecimentos nesta temática, a presente dissertação foi dividida em duas partes: a primeira, onde foram feitas injeções mediante a aplicação de uma pré-solução de silicone no meio poroso a injectar e a segunda fase, onde a solução de silicone foi directamente colocada na amassadura do grout. Por fim obter-se-á uma comparação dos resultados atingidos entre as duas formas de aumentar o ângulo de contacto, com vista a melhorar a injectabilidade dos meios porosos.

É de frisar que de forma a avaliar a eficiência das injeções de grout, criaram-se modelos que caracterizassem o núcleo interior de alvenarias antigas, situação esta que se poderá observar no capítulo referente à campanha experimental. De forma a avaliar a injectabilidade do grout recorreu-se a ensaios de ultra-sons e à técnica de tomografia ultra-sónica. Por outro lado e de modo a que fossem contabilizadas as resistências mecânicas dos provetes obtidos, foram realizados ensaios de corte e de tracção por compressão diametral.

Termos-chave: grout de cal hidráulica, silicone, meio poroso, injectabilidade, ângulo de contacto, tomografia ultra-sónica e ensaios mecânicos.

Abstract

Currently, the aging of heritage buildings is remarkable, specifically monuments and old buildings, as well as the growing concern and need for rehabilitation interventions to optimize habitability conditions, safety and comfort. In fact, most of these buildings are made of stone masonry that due to the lack of regular maintenance have originated limitations at a structural level over the years. In this sense, it is necessary to consolidate measures in order to restore the necessary structure's security. There are various techniques for this purpose such as casing, armed plasters, grout injection, among others. This study will focus on grout injection in order to restore compactness by filling the voids existing in the masonry. This way, not only will it obtain a mechanical strength increase, but also contribute to tension's uniformity and continuity of different ancient masonry cloths, with the ultimate aim being to increase the monolithic behavior of the wall.

Using this technique there is special attention regarding the compatibility of the injected grout against the constituent materials of masonry. The grout used in the study was made of hydraulic lime based taking into account the chemical, physical and mechanical properties of the materials constituting the old masonries. The purpose of the grout's choice is its injectability and durability to achieve the best possible performance. It is also necessary to study the porous environment because after the grout is injected, the suspension will lose its properties due to water absorption by the former. This phenomenon creates penetration problems for the grout, and consequently future structural problems by poor application of the technique. Therefore, there is the need to reduce the suction effect of the constituent water of the grout by the porous environment. According with Henriques (2011) it is known that through the addition of a water-repellent surface, it is possible to change the contact angle between the grout and the porous medium. One way to do this is to add silicone since this reduces water's suction effect.

This study focuses on the silicone application in order to change the contact's angle, as well as the repercussions that it has on injectability and mechanical strength. This water-repellent surface had already been used in the work carried out by Telha (2015). In his study, it was evaluated a differentiating factor in the grout's injectability, consisting of a pre-injection of a silicone dissolution in the porous environment.

In order to increase the knowledge on this topic this thesis is divided into two parts: The first in which injections were made through the application of a silicone pre-dissolution in a porous environment to be injected; and a second phase where the silicone dissolution was directly placed in the grout's mixing. Lastly, there will be a result comparison between the two ways of increasing the contact angle to improve the injectability of the porous environment.

It should be emphasized that in order to assess the effectiveness of grout's injections, models were created that characterized the inner core of ancient masonry, as seen in the chapter relative to the experiment. In order to evaluate the grout's injectability, ultrasonic testing and ultrasonic tomography techniques were used. On the other hand, to record the mechanical resistance of the obtained specimens, cutting and diametric tensile compression tests were conducted.

Keywords: grout injection, hydraulic lime grout, contact angle, silicone, porous media, injectability, ultrasonic tomography, mechanical tests.

Índice

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento do tema	1
1.2. Objectivos	3
1.3. Estrutura e organização da dissertação	3
2. ANÁLISE DO CONHECIMENTO	5
2.1. Noção de grout.....	5
2.2. Injecção de grout.....	6
2.3. Propriedades do grout no estado fresco	9
2.4. Propriedades do grout no estado endurecido	13
2.5. Superplastificantes	13
2.6. Meio poroso	14
2.6.1. Tensão superficial.....	15
2.6.2. Ângulo de contacto.....	16
2.6.3. Sucção capilar.....	18
2.6.4. Ligação grout meio poroso.....	19
3. CAMPANHA EXPERIMENTAL.....	20
3.1. Materiais utilizados.....	20
3.1.1. Cal hidráulica	20
3.1.2. Superplastificante	22
3.1.3. Meio poroso.....	23
3.1.4. Silicone.....	24
3.2. Procedimento da mistura	25
3.2.1. Grout sem silicone na sua constituição	25
3.2.2. Grout com silicone na sua constituição	26
3.3. Ensaio laboratoriais	27
3.3.1. Ensaio de injecção	27
3.3.2. Ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons	31
3.3.3. Ensaio mecânicos.....	34
3.3.4. Tomografia ultra-sónica	37
4. ANÁLISE DE RESULTADOS.....	39
4.1. Introdução.....	39
4.2. Avaliação da consolidação do grout sem silicone em vários meios porosos.....	39
4.2.1. Ensaio de Injecção.....	39

4.2.2.	Tomogramas ultra-sónicos	43
4.2.3.	Ensaio de resistência à tracção por compressão diametral	48
4.2.4.	Ensaio de resistência ao corte.....	51
4.2.5.	Comparação entre ensaios de resistência mecânica	56
4.3.	Avaliação da consolidação do grout com silicone em vários meios porosos	56
4.3.1.	Ensaio de injeccção	60
4.3.2.	Tomogramas ultra-sónicos	62
4.3.3.	Ensaio de resistência à tracção por compressão diametral	64
4.3.4.	Ensaio de resistência ao corte.....	65
4.4.	Comparações finais entre as técnicas de aplicação de hidrófugo de superfície.....	67
4.4.1.	Ensaos de injectabilidade	67
4.4.2.	Ensaos de tomografia ultra-sónica	69
4.4.3.	Ensaos de resistência à tracção por compressão diametral e corte.....	71
5.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	75
6.	BIBLIOGRAFIA.....	77

Índice de Quadros

Quadro 3.1 - Características da cal hidráulica HL5	21
Quadro 3.2 - Densidade e finura da cal HL5 através do parâmetro Blaine	21
Quadro 3.3 - Caracterização química da cal HL5 de acordo com os resultados XRF	21
Quadro 3.4 - Características do superplastificante	23
Quadro 3.5 - Composição granulométrica dos meios porosos em estudo.....	23
Quadro 3.6 - Composição do grout em estudo.....	26
Quadro 3.7 - Composição das diferentes soluções de silicone em estudo	26
Quadro 4.1 - Resultados dos ensaios de injectabilidade relativamente aos meios porosos cerâmicos.....	40
Quadro 4.2 - Resultados dos ensaios de injectabilidade relativamente aos meios porosos calcários.....	42
Quadro 4.3 – Resultados dos ensaios de resistência à tracção por compressão diametral – Material cerâmico de granulometria E.	48
Quadro 4.4 - Resultados dos ensaios de resistência à tracção por compressão diametral – Material calcário de granulometria E.	49
Quadro 4.5 - Resultados dos ensaios de resistência ao corte – Material cerâmico de granulometria A.	51
Quadro 4.6 - Resultados dos ensaios de resistência ao corte – Material cerâmico de granulometria B.....	52
Quadro 4.7 - Resultados dos ensaios de resistência ao corte – Material cerâmico de granulometria E.	52
Quadro 4.8 - Resultados dos ensaios de resistência ao corte – Material calcário de granulometria A.	53
Quadro 4.9 - Resultados dos ensaios de resistência ao corte – Material calcário de granulometria B.	54
Quadro 4.10 - Resultados dos ensaios de resistência ao corte – Material calcário de granulometria E.	54
Quadro 4.11 - Resultados do ensaio de injectabilidade para os meios porosos A, B e E injectados com grout com silicone na sua constituição.....	61
Quadro 4.12- Resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral relativamente aos meios porosos A e E injectados com grout com silicone e quantidades de superplastificante de 1,6% e 2%.	64
Quadro 4.13 - Resultados dos ensaios de resistência ao corte referentes à técnica que utiliza o silicone na constituição do grout.....	66
Quadro 4.14 Comparação dos resultados dos ensaios de injectabilidade referentes às duas técnicas de aplicação de hidrófugo e sem hidrófugo de superfície.	68
Quadro 4.15 - Comparação dos resultados dos ensaios de resistência ao corte e tracção por compressão diametral referentes às duas técnicas de aplicação do hidrófugo de superfície.....	72

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Esquema de injeção de grout in situ	7
Figura 2.2 - Procedimento esquemático para a aplicação da técnica de injeção de paredes de alvenaria.	8
Figura 2.5 - Representação da acção do superplastificante sobre as partículas de grout.	14
Figura 2.6 - Mecanismo de formação da tensão Superficial em moléculas de água.....	16
Figura 2.7 – Ângulo de contacto inferior a 90° - comportamento hidrófilo.	16
Figura 2.8 – Ângulo de contacto superior a 90° - comportamento hidrófobo	17
Figura 2.9 - Equilíbrio na linha de fronteira entre uma gota de líquido e a superfície de um sólido.	18
Figura 2.10 - Efeito da alteração do ângulo de contacto sobre o comportamento do grout	19
Figura 3.1 - Distribuição da granulometria da cal HL5.	22
Figura 3.2 – Imagens representativas do efeito do superplastificante. Amostra sem superplastificante com partículas de cimento floculadas à esquerda e com superplastificante à direita demonstrando partículas desfloculadas.....	22
Figura 3.3 – Modelo teórico de como se procedeu a injeção.	27
Figura 3.4 – Representação do processo de injeção.	28
Figura 3.5 – Imagens com maior detalhe das modificações feitas entre a bomba de ar comprimido e o meio poroso.....	28
Figura 3.6 – Novos moldes em pinho para o processo de injeção do meio poroso.....	29
Figura 3.7 - Marcação e medição de velocidades ultra-sónicas em provetes inteiros.....	32
Figura 3.8 - Esquema representativo da localização dos cortes efectuados nos provetes	33
Figura 3.9 - Máquina JUMBO a realizar um corte a húmido num provete inteiro.	33
Figura 3.10 - Esquema da malha de ensaio de ultra-sons de cada fatia de provete inteiro: Vista de topo à esquerda e vista lateral à direita.....	34
Figura 3.11 - Marcação e medição de velocidades ultra-sónicas em bolachas.	34
Figura 3.12 - Mecanismo de ruptura de um provete submetido ao ensaio de resistência à tracção por compressão diametral.....	35
Figura 3.13 – Mecanismo de ruptura de um provete submetido ao ensaio de corte.	36
Figura 3.14 - Representação de um ensaio de resistência ao corte a utilizar a máquina ZWICK/ROELL Z050.	36
Figura 4.1 - Tomogramas ultra-sónicos referentes às injeções de grout em meio poroso cerâmico pré-injectado com soluções de silicone 1:2; 1:4 e 1:6.	43
Figura 4.2 - Tomogramas ultra-sónicos referentes às injeções de grout em meio poroso calcário pré-injectado com soluções de silicone 1:2; 1:4 e 1:6.....	45
Figura 4.3 - Resultados do ensaio de espalhamento referentes a várias dosagens de superplastificante em grout com silicone na sua constituição em oposição ao grout sem silicone com 1,2% de SP.	58

Figura 4.4 - Resultados do ensaio do Cone de Marsh referentes a várias dosagens de superplastificante em grout com silicone na sua constituição em oposição ao grout sem silicone com 1,2% de SP.	59
Figura 4.5 - Resultados do ensaio de retenção de água referentes a várias dosagens de SP em grout com silicone na sua constituição em oposição ao grout sem silicone com 1,2% de SP ...	59
Figura 4.6 - Resultados do ensaio de estabilidade referentes a várias dosagens de SP em grout com silicone na sua constituição em oposição ao grout sem silicone com 1,2% de SP.....	60
Figura 4.7 - Tomogramas ultra-sónicos referentes às injeções de grout com silicone em meios porosos cerâmicos A, B e E com 1,6% e 2% de Superplastificante.....	62
Figura 4.8 - Comparação da tomografia ultra-sónica face às duas técnicas de introdução de hidrófugo de superfície.....	70

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do tema

Grande parte do património edificado é caracterizado pelo tipo de construção em alvenaria que se encontra por todo o planeta. Com o seu envelhecimento surge uma preocupação em manter a utilização do mesmo garantindo as melhores condições de habitabilidade, segurança e conforto, uma vez que representam um valor patrimonial e cultural do local onde estão inseridos. A alvenaria pode ser apresentada na sua constituição por um ou múltiplos panos. Quando é o caso de múltiplos panos, a secção é constituída por dois panos exteriores resistentes de textura irregular e um núcleo interior preenchido por pequenas pedras, areia, argamassa ou qualquer outro tipo de material não coeso (Vintzileou, 2011). Para a reparação deste tipo de construção, existem técnicas de reparação diferentes daquelas utilizadas em outras situações de edifícios mais modernos. Assim sendo e para estabilizar essas paredes e prevenir o colapso frágil da estrutura, a injeção de grout apresenta-se como uma técnica de consolidação bastante recomendada desde a década de 80 do século passado [(Kalagri et al., 2010), (Vintzileou 2011)].

Esta técnica tem como objectivos principais aumentar a compacidade da alvenaria, a qual, para além de incrementar a resistência à compressão, também cria adesão entre os elementos no interior da parede, permitindo, em simultâneo, restabelecer ligações entre os panos exteriores e interiores da alvenaria. Assim, consegue-se melhorar o comportamento monolítico e a resistência a cargas permanentes sem alterar a morfologia e o sistema de carga da parede de alvenaria [(Binda, 1997), (Miltiadou-Fezans & Tassios, 2013)].

Antes deste tipo de consolidação deve ser tido em conta a compatibilidade entre os materiais originais, a alvenaria, e os que irão ser aplicados, neste caso o grout (Callebaut et al., 2001). A utilização do ligante à base de cimento na conservação de edifícios históricos pode provocar grandes anomalias devido ao facto do cimento ter características muito diferentes dos materiais existentes, tais como, a mais elevada resistência mecânica, maior módulo de elasticidade e menor permeabilidade, tornando-se visível a necessidade de estudar a composição do grout no seu estado fresco antes de qualquer uso do mesmo.

Neste estudo optou-se por se utilizar cal hidráulica, devido às suas propriedades mecânicas, físicas e químicas, ainda que não sendo este o ligante que mais se assemelha aos materiais originais das alvenarias antigas. Optou-se também pelo uso de um adjuvante na composição do grout, nomeadamente, um superplastificante cujo objectivo passa por melhorar a injectabilidade.

Um factor não menos importante a ter em conta na injeção de grouts é a morfologia do suporte de onde dependem fenómenos de absorção/adsorção e os seus materiais constituintes (granulometria e superfície específica). É necessário avaliar a capacidade de penetração do grout tendo em conta o efeito de sucção causado pela rápida absorção de água da composição do grout que tem como consequência uma maior ou menor injectabilidade do grout.

Nesta temática tornou-se pertinente estudar o como diminuir esse efeito de sucção da água constituinte do grout por parte do meio poroso, optando-se, para esse efeito, por se alterar o ângulo de contacto entre o grout e o meio poroso, mediante a adição de um hidrófugo de superfície. Abordou-se esta questão de duas formas diferentes de modo a que se conseguisse tirar ilações de como seria a opção mais indicada consoante cada caso específico.

Na primeira fase o hidrófugo de superfície em causa, o silicone, foi introduzido através de uma pré-injeção de solução no meio poroso antes da injeção do grout. Este foi feito à semelhança do estudo efectuado por Telha (2015), embora, com algumas particularidades na fase de secagem do silicone no interior do meio poroso como se verá no capítulo relativo à campanha experimental. Na segunda abordagem, esta solução de silicone foi colocada directamente na amassadura do grout. Relativamente à primeira abordagem, foi utilizado um grout com 1,2% de superplastificante que já havia sido utilizado no âmbito de um estudo por parte de Telha (2015) e Jorne (2016) e indicado como a dosagem óptima para esta aplicação.

Com a introdução do silicone directamente na amassadura do grout, alteraram-se as características do grout no estado fresco que haviam sido estudadas. Assim existiu a necessidade de um novo estudo tendo como base a variação do superplastificante na mistura para que o grout com silicone na sua composição venha a ter características aproximadas daquelas que o grout sem silicone com 1,2% de superplastificante apresentava. Este estudo prévio foi realizado por Neno (2016).

Com o objectivo de estudar este factor diferenciador da injeção do grout no meio poroso foram criados modelos que simulassem com a maior fiabilidade possível diferentes permeabilidades passíveis de caracterizar o núcleo interior de alvenarias antigas. Para que se possa avaliar a qualidade destas injeções de grouts recorreu-se a ensaios de ultra-sons e à técnica de tomografia ultra-sónica o que permitiu informações valiosas qualitativas e quantitativas sobre os meios porosos em estudo. Foram também realizados ensaios de resistência à tracção por compressão diametral e de corte, de forma a conhecer e comparar as resistências mecânicas e as respectivas relações com a qualidade de injeção dos meios porosos.

É de notar que a campanha experimental foi elaborada em concomitância com a tese de doutoramento de Jorne (2016) e a dissertação de mestrado de Neno (2016), surgindo na sequência de outras injeções de grout realizadas em diferentes meios porosos, dando assim sequência a outros trabalhos de autores predecessores no âmbito da avaliação da penetrabilidade do grout no interior do meio poroso [(Brás & Henriques, 2012), (Kalagri et al., 2010), (Jorne et al., 2012a), (Jorne et al., 2014), (Jorne et al., 2015b), (Van Rickstal et al., 2003), (Coelho, 2013), (Telha F., 2015)], Baltazar et al., 2012a), (Baltazar et al., 2013a), (Baltazar et al., 2014a), (Baltazar & Henriques, 2015), (Jorne et al., 2012a), (Jorne & Henriques, 2013)].

1.2. Objectivos

Esta dissertação tem como principal meta a optimização da influência da alteração do ângulo de contacto dos diferentes meios porosos (material calcário e material cerâmico) com o grout, isto é, estudar a forma de reduzir a capacidade de absorção de água por parte do meio poroso com vista a que se consiga uma melhor injectabilidade traduzida numa maior compacidade e resistências mecânicas finais. Para tal este estudo debruça-se no modo de aplicação do hidrófugo de superfície no meio poroso. Numa primeira fase são feitas injeções de grout com uma pré-injecção de solução de silicone no meio poroso e, posteriormente, são feitas injeções com uma mistura de grout já com a solução de silicone na sua constituição. O principal objectivo será comparar as duas opções e tirar ilações acerca da injectabilidade e resistências mecânicas das mesmas. De forma a comparar os resultados obtidos, este estudo recorreu a ensaios não destrutivos, tais como o ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons, tomografia ultra-sónica e de seguida ensaios destrutivos de corte e de resistência à tracção por compressão diametral.

1.3. Estrutura e organização da dissertação

A presente dissertação é formada por 5 capítulos, sendo o primeiro meramente introdutório. No segundo será feito o estado de arte nomeando autores com estudos relacionados com o tema bem como introduzir noções relevantes à compreensão deste estudo. Ao ser esta dissertação composta em grande parte por ensaios laboratoriais, no terceiro capítulo será feito um resumo de todo o trabalho laboratorial efectuado bem como uma breve explicação dos ensaios que constituem a base para a análise que será feita no quarto capítulo. A análise de resultados relativa ao quarto capítulo estará subdividida em 3 fases: uma primeira fase, onde se analisam resultados relativos à técnica de aplicação do hidrófugo de superfície no meio poroso, uma segunda fase onde essa análise se reporta aos resultados referentes à técnica de introdução do hidrófugo de superfície directamente na amassadura do grout e, por fim, numa terceira fase uma breve comparação entre os resultados obtidos nas fases anteriores. O quinto e último capítulo é

composto por um resumo das comparações e relações feitas entre as duas técnicas estudadas bem como ideias para estudos futuros de modo a aprimorar estas técnicas.

2. ANÁLISE DO CONHECIMENTO

2.1. Noção de grout

Para que se possa perceber o que é um grout, existe a necessidade de explicar o que é uma argamassa, um material de construção conhecido que pode ser classificado de acordo com a sua aplicação, tipo de ligante, dosagem e, inclusive, a sua consistência. Em síntese e segundo a sua consistência, é possível categorizar as argamassas em secas, plásticas e fluidas, sendo que as últimas por vezes são apelidadas de argamassas de injeção quando o seu emprego se caracteriza em trabalhos de reparação e consolidação, uma vez que têm um elevado poder de penetração quando se encontram no estado fresco. Desta forma pode identificar-se a definição de grout da seguinte forma: *“Uma calda ou grout de injeção é uma argamassa utilizada no preenchimento, homogeneização, consolidação e/ou melhoria das propriedades mecânicas de sistemas que apresentem cavidades, vazios, fendas ou falta de coesão ou de sistemas totalmente não coesos”* (Tombakari, 2002).

O grout apresenta-se assim, como uma suspensão aquosa constituída por ligante, água, adjuvantes e eventualmente adições. A cal ou o cimento são parte constituinte do ligante da suspensão, existindo a possibilidade de se juntar, por exemplo, superplastificantes com o intuito de se conseguir grouts mais estáveis e grouts para a injeção (Jorne et al., 2014).

A escolha do ligante para a mistura do grout tem como principais fins a compatibilidade e a capacidade de lidar com os condicionalismos dos materiais originais da parede. Este será injectado com vista a não comprometer a capacidade de consolidação do conjunto. Como já foi referido anteriormente, no âmbito desta dissertação foi escolhida a cal hidráulica para este fim. Esta relativamente aos ligantes à base de cimento tem melhor compatibilidade com os materiais de suporte. Em comparação aos ligantes à base de cal aérea, estão são os que melhores características de compatibilidade apresentam, no entanto, devido às paredes de alvenaria antiga terem uma elevada espessura, origina a que no seu interior a presença de dióxido carbono seja diminuta o que torna o processo de carbonatação lento e consequentemente o endurecimento da cal muito demorada. Face a este impedimento a cal hidráulica acaba por ser a eleita.

Dito isto, a cal hidráulica é apontada como o ligante mais apropriado em virtude dos condicionalismos da alvenaria e da sua semelhança química, propriedades físicas e mecânicas dos materiais históricos quando equiparados aos ligantes à base de cimento ou resinas orgânicas [(Van Rickstal, 2000), (Binda et al., 1997), (Brás & Henriques, 2012), (Miltiadou-Fezans & Tassios., 2012), (Valluzzi et al., 2004), (Vintzileou, 2006)].

2.2. Injecção de grout

A técnica de injecção de grout é considerada uma das mais comuns e eficazes, é bastante usual e utilizada para a consolidação de estruturas de pedra e alvenaria argamassadas com mais que um pano em que muitas vezes apresentam uma baixa densidade e ligações fracas entre as várias camadas (Ignoul et., 2005). Em Portugal, esta técnica tem sido bastante utilizada seja em edifícios de habitação como em edificações de grande valor histórico como é o caso do Forte de S. Julião da Barra em Oeiras ou o Forte da Ericeira.

Os principais objectivos da técnica são preencher fissuras e espaços vazios, de modo a aumentar a continuidade e resistência da alvenaria, bem como, preencher lacunas entre dois ou mais panos de uma parede quando estas já não apresentam características monolíticas. Esta ligação de panos fornece uniformidade de tensões ao longo da secção transversal, ao estar na origem a qualidade das ligações que o grout consegue impor na alvenaria (Collepari, 1990), (Valluzzi, 2005).

Para que isto aconteça é necessário saber com precisão a morfologia da secção da parede, a composição dos materiais que a constituem - a fim de evitar incompatibilidades físicas e químicas com o grout - bem como, a distribuição e dimensão das fissuras, sendo que as características do grout e a permeabilidade e teor de humidade da alvenaria são também importantes para a avaliação da injectabilidade (Ignoul et., 2005).

A estrutura referente ao procedimento de injecção de grout in situ de uma parede num caso real está apresentada na figura 2.1. A misturadora está representada pela letra “A” onde se mistura o ligante, a água e possíveis adjuvantes ou aditivos para preparação do grout. Neste processo é essencial a desfloculação das partículas do ligante e que esta suspensão se mantenha homogénea; A letra “B” representa o colector ou reservatório; A letra “C” mostra a bomba de injecção que proporciona a pressão para que o grout seja injectado com a pressão constante; “D” identifica o tubo flexível que leva o grout da bomba até à parede a injectar; “G” representa o barómetro de controlo de pressão com pressão constante que deve ser definida no caderno de encargos; Por fim “H” representa um dos orifícios que permite a ligação ao tubo “D” e ainda permite que este funcione como tubo de purga.

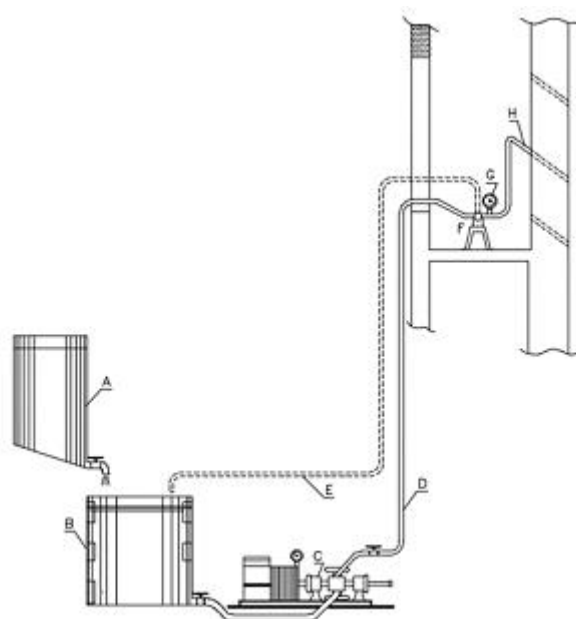


Figura 2.1 - Esquema de injeção de grout in situ (Van Rickstal, 2000)

Previamente a todo este processo é indispensável estancar todos os orifícios ou fissuras onde haja probabilidade de saída de grout. Este método não deve ser demasiado longo, pois quanto maior for o tempo de espera, maior será a floculação do grout e com o tempo este perde propriedades, designadamente, homogeneidade e fluidez. A ordem de injeção em cada orifício da malha quincôncio deve ser executada em função do estado da alvenaria. Ao se constatar a inexistência de qualquer impedimento o processo a utilizar é: primeiro na horizontal e depois de baixo para cima de forma a preencher todos os espaços vazios (Rodrigues, F., 2015).

A utilização desta técnica constitui um procedimento de carácter irreversível, em virtude da mesma impedir a possibilidade de retirar o grout que foi injectado na parede, devendo, por isso, o recurso à mesma ser efetuado de forma prudente e cuidadosa.

Como exemplo de problemas decorrentes do deficiente uso deste método, indica-se o elevado numero de edifícios que ruíram, em Itália, na sequência de sismos ocorridos em 1997, situação esta que conduziu a uma nova definição da técnica atrás referida, uma vez que se apurou como causa provável daqueles danos, a existência de uma injeção não uniforme ao longo da espessura da parede [(Binda et al., 2008), (Binda & Saisi, 1996)]. Esta nova definição passou pelo estudo através de ensaios não destrutivos como o de velocidade de propagação de ultra-sons que possibilita saber se a parede foi preenchida uniformemente.

Ademais da irreversibilidade deste método poderão haver outros problemas que podem ser sintetizados: (i) na falta de conhecimento da distribuição de vazios no interior da parede, (ii) na dificuldade de penetração do grout em aberturas inferiores a 2-3 mm, (iii) na dificuldade na escolha da distribuição granulométrica das partículas do grout devido à presença de vazios na parede de dimensões variadas, (iv) na segregação e retracção do grout devido à rápida absorção

de água dos materiais existentes na parede, (v), na necessidade de injeção a baixa pressão de modo a eliminar a presença de ar nos vazios e mesmo evitar a rotura da alvenaria e (vi) na dificuldade de penetração do grout especialmente na presença de materiais porosos (Telha, 2015).

De forma a reduzir os impasses acima referidos, é importante que, previamente, seja executado um diagnóstico e uma análise estrutural meticulosa, bem como se proceda a uma definição física e química das paredes. O esquema representado na figura 2.2 remete o método de aplicação da técnica de injeção com o fito de avaliar a injectabilidade da parede de alvenaria e investigar a validez da intervenção.

No que diz respeito a ensaios não-destrutivos, como ensaios sónicos, consegue-se que sejam realizados “in situ”, antes e depois da injeção de forma a verificar a penetração e difusão do grout. Este tipo de ensaios possui o grande benefício de não trazer qualquer alteração neste tipo de estruturas, o que a nível mecânico é muito importante, mormente em estruturas com algum tipo de danos.

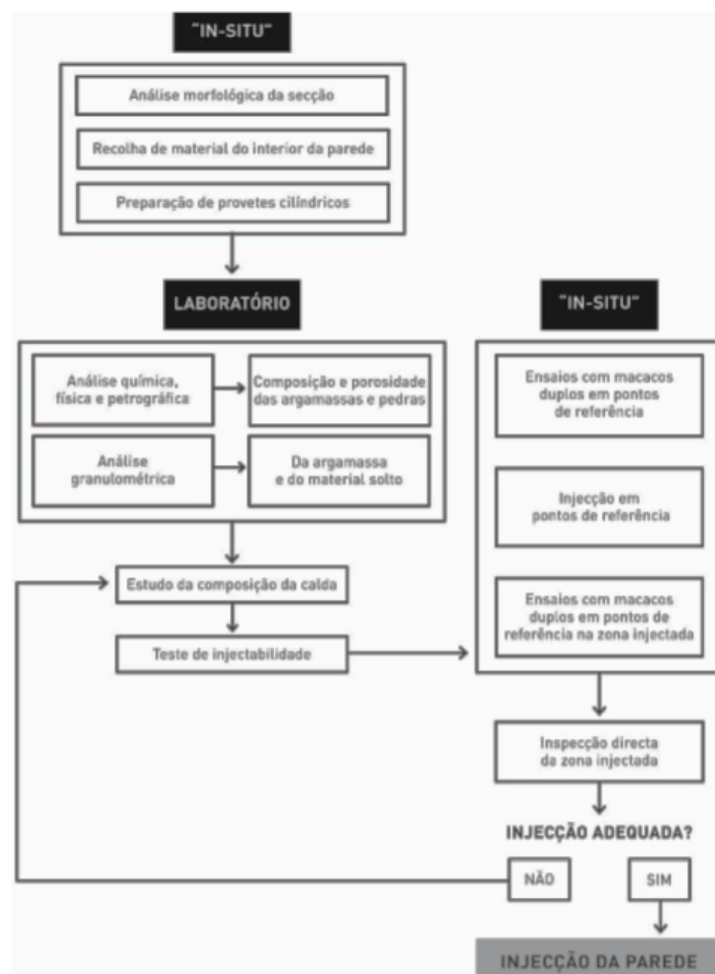


Figura 2.2 - Procedimento esquemático para a aplicação da técnica de injeção de paredes de alvenaria (Binda et al., 2006).

2.3. Propriedades do grout no estado fresco

A produção de um grout depende de uma sequência de requisitos que tenham como fim uma boa performance a nível de injectabilidade, resistência e durabilidade das alvenarias a serem sujeitas à técnica de injeção de grout.

Para que se possa perceber melhor o desempenho do grout é importante compreender a noção de fluído Newtoniano e não Newtoniano. O fluído Newtoniano é aquele onde a viscosidade embora ao variar com a temperatura e pressão, não varia com a aplicação de uma taxa de corte nem apresenta propriedades elásticas como por exemplo a água. Os fluídos não-Newtonianos podem ser de três tipos: reofluidificante “shear thinning” cuja viscosidade decresce com o aumento da taxa de corte, reoespessantes “shear-thickening” em que a viscosidade aumenta com o aumento da taxa de corte e por último, o grout de Bingham, que corresponde a um material que só se deforma a partir de um determinado valor crítico chamado tensão de cedência “yield stress”, que se comporta depois como um grout Newtoniano (Matos, 2013).

O desempenho de um grout no estado fresco resulta da quantidade de água utilizada na amassadura, isto é, a água deve propiciar a injeção mas não deve exceder valores que alterem excessivamente as propriedades da mistura. A relação água/ligante na constituição do grout é um parâmetro fundamental para o bom desempenho da injeção. Segundo Toumbakari, para uma relação água/ligante elevada, os grouts são grouts praticamente newtonianos, uma vez que a viscosidade é constante para qualquer tensão a que seja submetida. Ao diminuir a relação água/ligante, o comportamento do grout torna-se gradualmente reofluidificante, passando a viscosidade a ser variável em função da tensão aplicada. De acordo com os valores da relação água/ligante normalmente utilizados, considera-se que o grout é um grout com um comportamento não-Newtoniano (ou grout Binghamiano, quando avaliado de acordo com o modelo de Bingham) recorrendo-se aos modelos de Bingham e de Herschel-Bulkley para a avaliação do seu comportamento [(Brás, 2011), (Baltazar et al., 2013b), (Toumbakari, 2002)].

Enunciam-se adiante um conjunto de requisitos, de cuja observância, se pode concluir por uma adequada e conveniente injeção (adaptado de (Binda et al., 1997))

- **Requisitos reológicos:**

Pretende-se fluidez durante o processo de injeção e capacidade de penetração uniforme de modo a que haja um completo preenchimento dos vazios de igual forma (injectabilidade, propriedades caracterizadas pela homogeneidade, ausência de grumos, com granulometria inferior à dimensão dos vazios a preencher, baixa viscosidade, etc.);

ausência de segregações de modo a evitar heterogeneidades;

exsudação deve ser mínima de modo a diminuir presença de vazios quando a mistura estiver no estado endurecido.

- **Requisitos químicos:**

Deve ter características químicas estáveis no tempo, isto é, ser capaz de formar ligações químicas fortes com o material existente, através de reacções irreversíveis;

Deve ter resistência aos sais de sulfato, de modo a evitar a formação de produtos expansivos e eflorescências;

- **Requisitos físicos:**

O tempo de início de presa deve ser adequado ao tempo necessário à execução da injeção;

As propriedades higroscópicas devem ser caracterizadas por insolubilidade em água e estabilidade volumétrica na presença de humidade;

Deve possuir baixa retracção;

- **Requisitos mecânicos:**

Deve ter características mecânicas e de rigidez similares aos materiais originais ou apenas ligeiramente superiores;

Deve ter boa e adequada aderência ao suporte para o bom funcionamento do conjunto.

O estudo das propriedades do grout no estado fresco, nomeadamente, a fluidez, estabilidade (segregação/exsudação) e faculdade de retenção de água, entre outras, proporciona caracterizar o comportamento deformacional do grout.

É igualmente importante perceber algumas das mais importantes propriedades do grout fresco utilizadas no seu estudo e abaixo elencadas:

- i) **Fluidez**

A fluidez de um grout está directamente relacionada com a injectabilidade, isto é, é de todo o interesse que este tenha facilidade de fluir através das fissuras e vazios da alvenaria sem perda de pressão, aquando do acto de injeção. Esta característica do grout está essencialmente relacionada com o método de mistura do grout, quantidade de água da amassadura, distribuição granulométrica, natureza, forma e superfície específica das partículas (Vintzileou, 2006).

Para Valluzzi a fluidez revela-se na faculdade que o material tem de se manter no estado grout durante um tempo capaz enquanto ocorre difusão homogénea das cavidades (Valluzzi, 2000).

Outro aspecto importante a referir é o comportamento reológico do grout, consistindo a reologia, segundo Bingham, como a ciência que estuda o escoamento e a deformação dos materiais (Bingham, 1929). Pode afirmar-se que o comportamento reológico do grout é respeitante às suas propriedades no estado fresco. Desta feita, torna-se importante que a reologia destes materiais seja percebida e gerida, para que possam ser injectados e fluam nos respectivos

meios porosos (Guerreiro, 2014). O comportamento reológico do grout aparece, assim, relacionado com a sua fluidez visto que este é um factor determinante na injeção do mesmo. Para efeitos do comportamento reológico do grout torna-se ainda necessário compreender duas grandezas fundamentais: a tensão de cedência e a viscosidade plástica do grout de injeção.

A **tensão de cedência** está interligada à tensão mínima que é necessário aplicar à suspensão para que esta comece a fluir. Por outras palavras, corresponde à capacidade de enchimento do grout e ao facto deste fluir, ou não, quando submetido a uma tensão aplicada. A tensão de cedência permite perceber se o grout se começa a deformar, pois representa o valor crítico necessário para que tal aconteça.

A **viscosidade plástica** sob outra perspectiva evidencia a resistência ao fluxo aquando este é iniciado, isto é, esta pode ser associada à velocidade de um grout que fluirá depois do início do escoamento. É de notar que uma viscosidade plástica elevada torna o fluxo mais vagaroso devido às interações coloidais excessivas por parte das partículas em suspensão. Por outro lado, uma viscosidade plástica baixa traduz-se na maior facilidade da suspensão fluir (Baltazar et al., 2013b).

É importante referenciar que com a viscosidade plástica se consegue diferenciar grouts mais fáceis de se trabalhar dos que apresentam uma maior resistência ao escoamento, tendo igualmente função de controlar a qualidade do grout fresco tal como a tensão de cedência.

Outra questão importante na reologia do grout é a influência da **variável tempo de repouso**, isto é, o comportamento tixotrópico. Isto significa que no caso de um grout, a viscosidade depende não só da tensão de corte aplicada, mas também do intervalo de tempo entre a suspensão ser submetida à tensão e a injeção ser efectuada, e ao do historial de tensões de corte aplicadas, que resulta num comportamento de histerese. Grouts à base de cal hidráulica podem ser considerados materiais tixotrópicos, desde que num curto intervalo de tempo [(Guerreiro, 2014), (Baltazar et al., 2012a), (Baltazar et al., 2013a)].

Um aspecto que igualmente não se deve descurar na altura de uma injeção é a **temperatura** do local, pois esta pode ser feita em vários locais do globo bem como em várias alturas do ano, existindo sempre uma temperatura associada que toma valores diferentes consoante o local e a estação do ano. Na verdade, uma vez que não se consegue alterar a temperatura no local de injeção, torna-se imprescindível compreender a influência que esta variável tem na capacidade de injeção e perceber as consequências daí decorrentes, sendo que se deve escolher sempre a melhor altura do ano para efectuar as injeções, tendo em vista obter melhores resultados. (Baltazar et al., 2013a)

Outro aspecto não menos importante numa injeção é a sua **pressão**, a qual pode variar em função da composição do grout, designadamente, do tamanho e disposição das suas partículas. Assim, segundo diversos autores, para uma injeção eficaz de cal hidráulica à semelhança da utilizada nesta dissertação, a pressão deve apresentar valores entre 0,5 (Binda et al., 1997) (Valluzzi, 2015) e cerca de 1,5 Bar (Brás & Henriques, 2012) (Corradi et al., 2008).

ii) Estabilidade

Relativamente à estabilidade, pode afirmar-se que esta se caracteriza pela capacidade que um grout tem em preservar uma distribuição homogénea de partículas aquando do procedimento de injeção e depois do termo das operações de injeção da mistura dentro do meio poroso. Ainda assim, existe sempre uma possibilidade de existirem episódios de instabilidade devido à natureza do grout. Este é composto por uma quantidade de partículas sólidas, dispersas em água, o que forma uma conectividade do aglomerado de canais de dimensões diversas onde esta água transita. Posteriormente à mistura, as partículas sólidas subdividem-se conforme as forças gravitacionais e de fricção, bem como as forças de ligação entre as partículas. Estes fenómenos de instabilidade são designados por segregação e exsudação.

A segregação consiste na rápida organização das partículas e/ou aglomerados de partículas de ligante, havendo uma propensão para estas se posicionarem de uma forma estratificada na suspensão de grout, ocorrendo uma alteração da massa volúmica da suspensão em função da altura, o que dificulta a injeção do grout (Miltiadou-Fezans & Tassios, 2013). Este fenómeno está sujeito à quantidade de água utilizada, à forma, dimensão e massa volúmica das partículas do grout (Laeffer et al., 1996).

A exsudação evidencia-se através da migração de partículas de água à flor da suspensão do grout, ao originar uma película de água superficial. Quando a exsudação não é excessiva, isto é, no começo, as forças de ligação entre as partículas sólidas são ainda suficientemente fortes para aguentar a microestrutura da mistura. No entanto, com o decorrer do processo, onde já exista uma exsudação excessiva, possivelmente derivado da relação água/ligante utilizada e/ou à organização granulométrica do ligante, este episódio pode ocasionar numa suspensão de grout heterogénea, ao impossibilitar a capacidade de penetração do grout no meio poroso e/ou que haja uma boa união entre os materiais (Miltiadou-Fezans & Tassios, 2013). Posteriormente ao processo de cura do grout, a evaporação da água que ficou á superfície poderá resultar em aparecimento de vazios o que poderá prejudicar a resistência da estrutura e, consequentemente, originar baixa durabilidade.

iii) Retenção de água

A retenção de água é a capacidade que um grout tem (mais ou menos) de reter a água da mistura durante a injeção no interior de alvenarias secas e de elevada absorção. Esta valência irá propiciar uma injeção mais eficaz quanto mais tempo conseguir reter a água no interior da suspensão do grout (Assaad & Daou, 2014). Este aspecto é particularmente importante visto que a perda de água na constituição da mistura ao ser injectada, pode provocar um efeito de tamponamento devido ao aumento de atrito interno e colisão entre as partículas sólidas, ao originar uma diminuição do grau de dispersão e, consequentemente, uma menor injeção [(Brás

& Henriques, 2012), (Van Rickstal, 2000), (Assaad & Daou, 2014)]. É igualmente importante realçar que a resolução de problemas de injectabilidade e fluidez pode passar por aumentar o teor em água (Rosquoet et al., 2003) mas não desmedidamente, uma vez que este tipo de solução dá origem a um grout menos estável, com hipóteses de ocorrência de fenómenos de segregação e exsudação tal como uma diminuição da resistência mecânica e aumento da porosidade no seu estado endurecido (Biçer-Simsir et al., 2009), (Uranjek & Bosiljkov, 2012).

2.4. Propriedades do grout no estado endurecido

O estudo das propriedades do grout no estado endurecido é igualmente importante ao estudo no seu estado fresco, uma vez que este quando é destinado à estabilização de alvenarias de panos múltiplos está sobre acções de compressão, corte e tracção. Esta dissertação foca grande parte da sua campanha experimental no comportamento mecânico do grout após presa procedendo a ensaios de corte e tracção do conjunto grout com a estrutura do suporte que é representada por diferentes meios porosos. As características do grout têm em vista um aumento da coesão e da resistência mecânica do suporte (Jorne et al., 2015). É de notar, como já foi referido anteriormente, que esta ligação grout - meio poroso, deve ser feita de modo a que haja compatibilidade de materiais, tanto física como mecânica, sendo que as propriedades do grout (Módulo de elasticidade entre outras características) devem ser tanto quanto possível as mais próximas das propriedades do suporte, neste caso do que o representa, o meio poroso.

2.5. Superplastificantes

Os superplastificantes segundo a NP EN 934-2 (IPQ. NP EN 934-2) são adjuvantes que conseguem, sem alterar a consistência, diminuir bastante a dosagem de água num determinado betão, ou, sem variar a dosagem de água, incrementar muito o espalhamento, ou ocasionar os dois efeitos conjuntamente. Estes são adicionados aquando a amassadura do grout, concedendo bastantes benefícios associados à sua trabalhabilidade. O principal fim de um superplastificante é controlar e aperfeiçoar o comportamento reológico dos grouts de injeção, desflocular a pasta de cimento, ou, neste caso, a cal hidráulica e aumentar a quantidade de água livre na mistura. Como fruto desta melhoria do comportamento reológico da pasta, é possível obter dois efeitos: O aumento da resistência e durabilidade diminuindo a quantidade da quantidade de água na mistura (razão água/ligante) ou aumentar a trabalhabilidade da suspensão mantendo a mesma proporção de água/ligante [(Matos, 2013), (Collepari, 1998), (Golaszewski, 2012)]. Por outras palavras, o superplastificante é um adjuvante do qual a acção é assente em forças repulsivas, quimicamente falando, é um agente de superfície activo que opera no meio das partículas de ligante por intermédio de cargas electrostáticas e/ou incorporando longas cadeias de polímeros nas partículas, criando assim repulsão entre elas (Martins & Bombard, 2011).

Nessa conformidade é expectável uma melhoria dos parâmetros reológicos: redução da viscosidade plástica e da tensão de cedência. Assim, a tensão de cedência e, em menor amplitude, a viscosidade plástica, decrescem com o aumento da acumulação de superplastificante até uma determinada dosagem máxima deste. Desta forma, adquirem-se tensões de cedência baixas em virtude da dispersão de partículas (Matos, 2013).

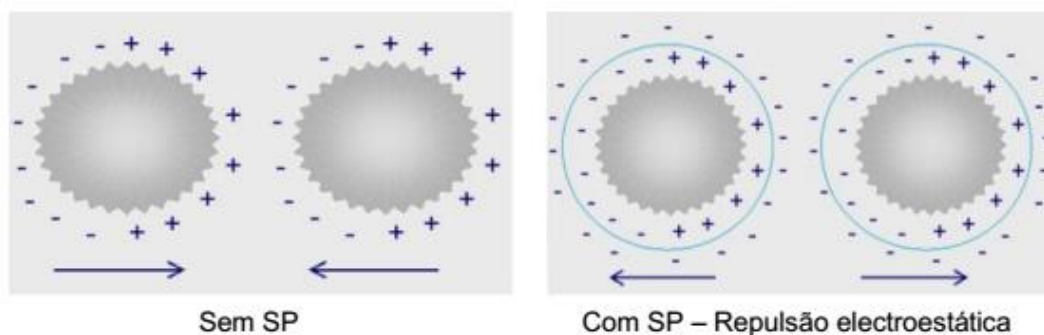


Figura 2.3 - Representação da acção do superplastificante sobre as partículas de grout (Guerreiro, 2014).

2.6. Meio poroso

O meio poroso é um factor decisivo na injectabilidade do grout, podendo ser descrito como um sólido que contém vazios ou poros, que estão ligados ou não, dispersos de uma forma regular ou aleatória (Van Rickstal, 2000). Como é natural, as partículas estão organizadas granulometricamente de diferentes formas e, dependendo do tipo de material, têm diferentes permeabilidades o que vai ocasionar injectabilidades distintas.

É de referir que nos meios porosos estudados nesta dissertação encontram-se vazios passíveis de serem transpostos pelo grout, intitulados de “espaços intraparticulares”, quando alusivo aos vazios no interior das partículas do meio poroso, e “espaços interparticulares”, referentes aos espaços entre as partículas (Coelho, 2013). Se os espaços intraparticulares forem de dimensão inferior à granulometria das partículas de ligante, estas ficam impossibilitadas de penetrar, o que origina uma penetração de carácter superficial, uma vez que apenas a componente líquida terá aquela capacidade de penetração.

A essência do meio poroso é caracterizada por várias propriedades que indicam a maior ou menor penetrabilidade do grout. As mais relevantes para o caso são:

- **Porosidade** – Igualmente designada por volume de vazios, é a parcela de volume aparente que corresponde aos poros.
- **Porometria** – Tamanho dos poros que compõe o meio poroso.
- **Distribuição do tamanho dos poros** – Todo o meio poroso segundo a sua granulometria evidencia variabilidades na distribuição dos vazios e poros. Torna-se relevante a forma como

os vazios comunicam entre si pois estes têm pertinência no caminho mais árduo ou acessível que o grout tem para preencher o máximo volume de vazios possíveis.

Como se pode concluir é de extrema importância saber a constituição das partículas do meio poroso da parede ou o tipo de parede a injectar.

Outra questão importante sobre o meio poroso é se este se encontra seco, uma vez que quando um grout é injectado num meio poroso seco dá-se um fenómeno de absorção rápida da água da sua constituição pelos poros de menores dimensões, sendo que também o seu rácio de A/L vai diminuindo devido à água absorvida pelas partículas do meio poroso, o que dá origem ao aumento repentino da viscosidade e densidade do grout o que leva a que este deixe de fluir [(Jorne et al., 2015b); (Jorne et al., 2012)]. Este fenómeno caracteriza-se por um conjunto de forças de sucção, que depende essencialmente das características do grout, ou seja, na forma como este molha a superfície, em termos de tensão superficial e das características da superfície, isto é, através do ângulo de contacto formado entre esta e o grout.

Os movimentos da água nos meios porosos muitas vezes contrariam a acção da gravidade devido a fenómenos de **capilaridade**. Estes episódios de capilaridade são originados pela ocorrência de forças de sucção que possibilitam que tal aconteça. Tal situação deve-se à forma como o líquido molha a superfície, o que significa que tais episódios são condicionados, simultaneamente, pelas características do líquido, em termos da sua tensão superficial e, da sua superfície, através do ângulo de contacto.

2.6.1. Tensão superficial

Relativamente aos mecanismos de **tensão superficial**, estes podem ser facilmente compreendidos desta forma: Quando existem várias moléculas de água, existem forças de atracção entre as mesmas devido às ligações que se estabelecem entre os átomos que as constituem, nomeadamente, oxigénio e hidrogénio, até que estas se envolvem umas com as outras anulando entre si essas forças de atracção, ficando em equilíbrio. Se houver uma gota de água em contacto com uma superfície, uma parte das forças não será compensada, originando uma força de valor superior às restantes, perpendicular à superfície onde estiver a molécula, sendo que quanto mais perto da superfície maior será a força (Henriques, 2011).

Pode ver-se a diferença de comportamento das forças de atracção quando se encontram no interior do líquido e estão em equilíbrio, e quando se encontram perto da superfície, na figura abaixo representada. Constata-se que apenas as forças de atracção na direcção horizontal estão compensadas.

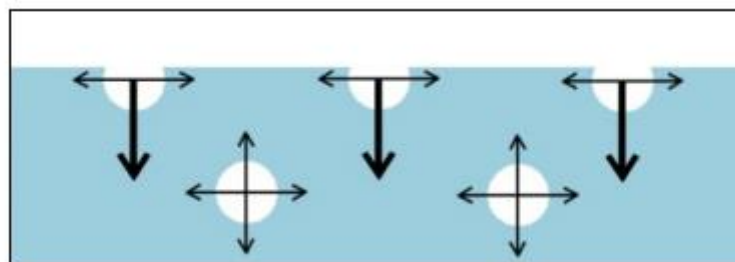


Figura 2.4 - Mecanismo de formação da tensão Superficial em moléculas de água [(Telha, 2015), (Adaptado de Henriques, 2011)].

2.6.2. Ângulo de contacto

Nas zonas de proximidade do grout com as paredes de um poro da superfície, verificam-se forças de atracção diferentes devido ao conceito de ângulo de contacto (Θ), o qual é determinado pela inclinação da tangente a uma gota do líquido sobre a superfície em causa. Esta medição tem uma grande utilidade, uma vez que permite avaliar de uma maneira clara a afinidade entre uma superfície e um grout, quando estes ficam em contacto. Nessa conformidade pode existir uma maior ou menor molhabilidade da superfície, consistindo esta na capacidade que um líquido tem de molhar uma superfície [(Bracco & Holst, 2013), (Henriques 2011)].

Quando as forças de atracção do grout às paredes do poro forem superiores às forças de atracção entre o grout e o ar, o ângulo de contacto é, como se pode observar através da figura 2.7 ($\Theta < 90^\circ$).

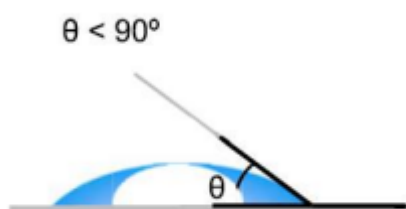


Figura 2.5 – Ângulo de contacto inferior a 90° - comportamento hidrófilo – (Adaptado de (Bracco & Holst, 2013)).

Esta situação identifica-se como traduzindo um comportamento hidrófilo pela parte do material nas paredes do poro. Por outro lado quando as forças de atracção do líquido às paredes do poro são inferiores às forças de atracção entre o líquido e o ar, o ângulo de contacto assume valores de ($\Theta > 90^\circ$) (Figura 2.8).

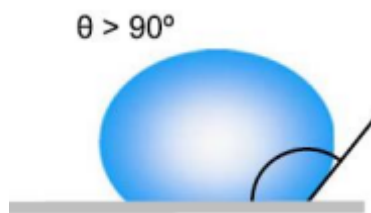


Figura 2.6 – Ângulo de contacto superior a 90° - comportamento hidrófobo – (Adaptado de (Bracco & Holst, 2013)).

A este material está associado um comportamento hidrófobo, isto é, as forças de coesão do grout superam as forças de adesão da superfície, deixando de existir um fenómeno de sucção e passando a haver um fenómeno de repulsão na superfície do corpo sólido.

Na maior parte dos casos quando existe água sobre materiais de construção assume-se que o ângulo de contacto ronda valores próximos de ($\Theta = 0^\circ$) ou $\Theta < 90$, sendo que nos materiais sintéticos, em geral, assume-se ($\Theta > 90$).

Contudo, se for aplicado um hidrófugo de superfície (material da família dos silicones) sobre uma argamassa, o valor do ângulo será $\Theta > 90$ consoante a eficácia do hidrófugo aplicado, tornando-a repelente.

Quimicamente falando, as superfícies dos materiais correntes denotam propriedades polares que ao serem alteradas por um hidrófugo passam a ter igualmente propriedades apolares ou não-polares, o que provoca uma alteração no comportamento quando na presença de um grout. Pode concluir-se que quanto mais características apolares tiver o material, mais este se comporta como um material hidrófobo por mérito da aplicação do hidrófugo.

Sendo a **molhabilidade** a capacidade que um líquido tem de molhar uma superfície, resultando da interacção molecular entre uma gota de um líquido e uma superfície sólida. Tal ocorrência pode ser representada por intermédio da equação de Young (Eq. 2.1), que traduz o balanço das tensões superficiais para uma gota em equilíbrio na superfície do sólido [(Bracco & Holst, 2013), (Henriques 2011)];

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{SG} - \sigma_{SL}}{\sigma_{LG}} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

onde:

θ – Ângulo de contacto;

σ_{SG} – Tensão superficial entre sólido e gás;

σ_{SL} – Tensão superficial entre sólido e líquido;

σ_{LG} – Tensão superficial entre líquido e gás.

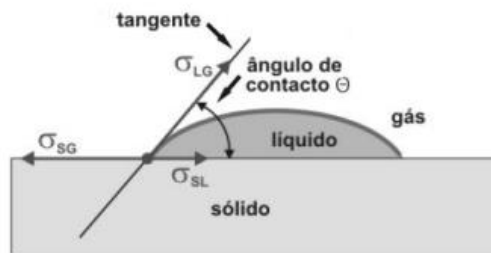


Figura 2.7 - Equilíbrio na linha de fronteira entre uma gota de líquido e a superfície de um sólido (Rato, 2006).

Retomando o conceito de ângulo de contacto, este é consequência de um equilíbrio entre as forças de coesão do líquido e as forças de adesão entre o sólido e o líquido. O mecanismo de coesão baseia-se nas forças de atracção entre as moléculas do líquido que se atraem entre si e está relacionado com as forças entre as moléculas do estado líquido e as partículas sólidas. Desta forma decorrente do equilíbrio entre as forças de atracção e coesão irá haver uma maior ou menor molhabilidade da partícula sólida, o que corresponde a um certo ângulo de contacto.

2.6.3. Sucção capilar

O meio poroso onde é injectado o grout como já foi dito anteriormente tem a tendência de absorver a componente líquida do grout criando uma maior resistência à penetração do grout. Esta absorção depende da forma e dimensão dos poros constituintes do meio poroso, bem como da quantidade de água que reside neste.

Existe um modelo teórico criado por Washburn que ajuda a compreender os mecanismos inerentes à penetração do grout no meio poroso. Este modelo está associado a grouts não-molhantes, no entanto, os mesmos conceitos podem ser aplicados no âmbito da presente dissertação. O estudo baseia-se na injeção de mercúrio em materiais secos, executando pressão sobre a superfície, no qual se regista o seu volume de intrusão. É de referir que o mercúrio apresenta um ângulo de contacto superior a 90° , sendo que quando é colocado em contacto com a superfície este sofre repulsão. Para que este conseguisse penetrar no meio poroso seria necessária uma pressão externa que superasse a sua tensão superficial elevada (Correia, 2013).

Para o caso do grout e visto que este é um grout molhante com um ângulo de contacto inferior a 90° , quando está em contacto com o meio poroso tem tendência a ser sugado pelos seus poros, devido a forças de sucção. Esta sucção capilar pode ser explicada através da equação de Young-Laplace:

$$S = \frac{4\sigma \cos \theta}{D} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Através da equação nota-se que a sucção capilar depende da tensão superficial do grout σ , do ângulo de contacto θ (em cada ponto de contacto com a parede do poro) e do tamanho do poro D .

Também é possível deduzir que o tamanho do poro e a sucção capilar são variáveis inversamente proporcionais e que a sucção capilar será maior quanto menores forem os ângulos de contacto e/ou o tamanho dos poros, como se pode melhor compreender através da figura abaixo indicada.

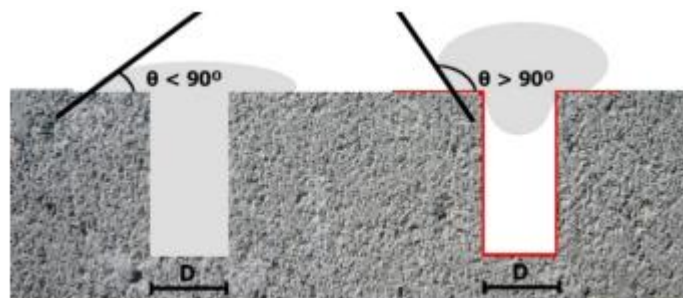


Figura 2.8 - Efeito da alteração do ângulo de contacto sobre o comportamento do grout [(Telha, F., 2015) adaptado de (Correia, Groen et al., 2003)].

Desta feita, nas zonas onde existe o efeito de sucção, o grout perde uma maior parte da sua componente líquida, perdendo fluidez e, consequentemente, perdendo capacidade de penetração não preservando as suas propriedades reológicas.

2.6.4. Ligação grout meio poroso

Pode afirmar-se que a ligação entre o meio poroso e o grout é, simultaneamente, química e mecânica. É química devido às reacções no meio dos materiais e das interfaces e mecânica, em virtude dos produtos de hidratação transferidos para os poros superficiais do suporte (meio poroso) [(Reda Taha & Shrive, 2001)].

É igualmente bastante relevante conhecer as características do meio poroso (porosidade, tamanho dos poros, rugosidade, superfície específica e outras), pois estas condicionam a aderência do ligante à parede do poro ocasionando modificações na fluidez do grout no estado fresco e mais tarde na compacidade no seu estado endurecido. Sabe-se que quanto mais rugosa e maior for a área de superfície sólida da partícula do meio poroso, maior capacidade tem de absorver a água da mistura de grout, o que vai influenciar tanto a injectabilidade como a compacidade final do meio poroso.

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

O trabalho experimental foi efectuado nas instalações do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

No presente capítulo, começa-se por se caracterizar o grout e todos os materiais inerentes à sua mistura. De seguida é feita uma exposição dos procedimentos da mistura e injeção tanto do grout com hidrófugo de superfície na sua composição, como daquele que não o contém. Por fim será feita uma descrição dos ensaios realizados aos provetes resultantes das injeções, ensaios estes que irão ajudar a avaliar a injectabilidade e resistência mecânica daqueles, bem como, permitir comparar resultados entre as duas composições de grout estudadas.

Todos os ensaios foram feitos com a participação de Eduardo Neno, no âmbito da sua dissertação de mestrado, onde este focaliza o estudo prévio do grout para a injeção, ao passo que a presente dissertação se debruça com mais realce a partir do modo de preparação da injeção propriamente dita e nos ensaios posteriores a este. De modo a que se compreenda melhor o encadeamento do presente capítulo, convém resumir o trabalho experimental que foi feito.

Numa primeira fase foram feitas injeções de grout sem silicone na sua composição em meios porosos calcários e cerâmicos, sendo que estes continham soluções de silicone pré-injectadas com traços 1:2, 1:4 e 1:6 respectivamente. De seguida, utilizando os provetes injectados, foram feitos ensaios de ultra-sons que deram origem à tomografia ultra-sónica, ensaios de corte e de tracção por compressão diametral. Posteriormente a todo este processo, o mesmo foi repetido, variando a composição do grout, colocando o hidrófugo de superfície directamente na mistura de grout. Desta forma, de modo a avaliar tanto a nível de injectabilidade, como a nível de resistência mecânica, foram feitas injeções no material cerâmico, alterando-se, desta vez, a quantidade de superplastificante na composição do grout.

Toda a campanha experimental foi feita com grout à base de cal hidráulica devido ao facto da mesma possuir uma maior compatibilidade mecânica, física e química com os materiais primogénitos das alvenarias antigas, comparativamente ao cimento. O ligante utilizado foi produzido em Portugal pela Secil Martingança de acordo com a norma europeia EN459-1:2010 e rotulado como HL5.

3.1. Materiais utilizados

3.1.1. Cal hidráulica

Optou-se pela utilização de um ligante à base de cal hidráulica produzido em Portugal pela Secil Martingança de acordo com a norma europeia EN459-1:2010 e rotulado como HL5. A

escolha deveu-se ao facto do grout à base de cal hidráulica deter uma maior compatibilidade com os materiais existentes em alvenarias antigas em comparação a um grout cimentício.

Quadro 3.1 - Características da cal hidráulica HL5 ^a

Resistência mecânica à compressão	7 dias $\geq 2,0$ MPa
	28 dias $\geq 5,0$ e $\leq 15,0$ MPa
Finura	90 $\mu\text{m} \leq 15,0$ %
	200 $\mu\text{m} \leq 2,0$ %
Tempo de presa	Inicial: $> 1\text{h}$
	Final: $\leq 15\text{h}$
Expansibilidade	$\leq 2,0$ mm
Cal livre	3,89%
Perda ao rubro	19,84%

^a Como indicado na ficha técnica do fornecedor

Quadro 3.2 - Densidade e finura da cal HL5 através do parâmetro Blaine (Jorne, 2014)

Amostra	HL5
Densidade	2,7
Finura Blaine (cm^2/g)	9400

Quadro 3.3 - Caracterização química da cal HL5 de acordo com os resultados XRF (Jorne, 2014)

Nome do Composto	HL5
MgO	0,99
Al₂O₃	2,96
SiO₂	10,86
SO₃	1,97
K₂O	0,89
CaO	78,97
TiO₂	0,30
MnO	0,04
Fe₂O₃	2,96
SrO	0,06
Na₂O	0,26

A distribuição da granulometria da cal HL5 utilizada no processo experimental para caracterização do grout está representada na figura 3.1.

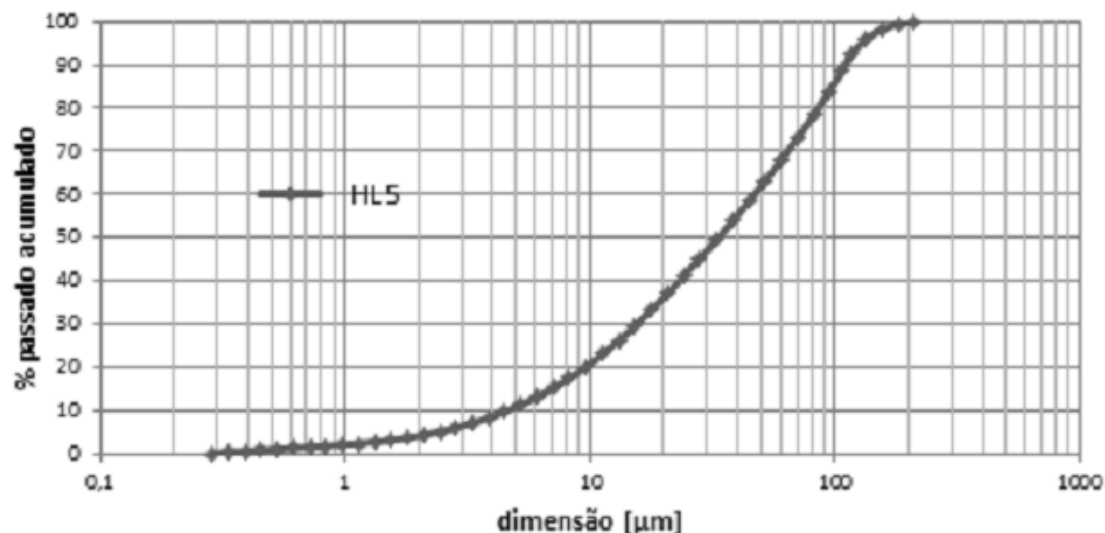


Figura 3.1 - Distribuição da granulometria da cal HL5 (Jorne, 2014).

3.1.2. Superplastificante

Foi empregue um adjuvante que já foi utilizado em trabalhos anteriores à base de policarboxilato (Glenium Sky617) fabricado pela BASF. Este superplastificante faz parte da terceira geração onde a repulsão é um arranjo de efeitos estéricos e eletrostáticos acoplados, igualmente conhecida como repulsão electroestérica [(Roussel et al., 2010), (Vikan, 2005)]. Dito de outra forma, a superfície das partículas de ligante é revestida pelo superplastificante o que causa uma repulsão entre as partículas, afastando-as e provocando uma diminuição do fenómeno de floculação e de segregação. O fenómeno indicado pode ser observado pela figura 3.2.

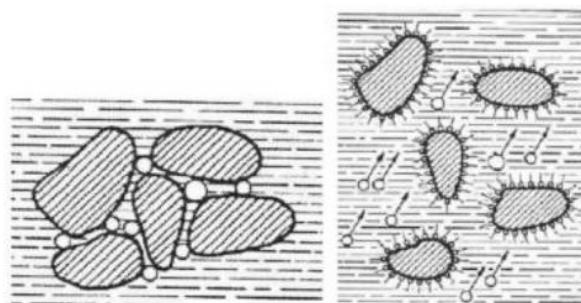


Figura 3.2 – Imagens representativas do efeito do superplastificante. Amostra sem superplastificante com partículas de cimento floculadas à esquerda e com superplastificante à direita demonstrando partículas desfloculadas (Ribeiro, 2008).

Desta forma as propriedades reológicas do grout são melhoradas, diminuindo a viscosidade plástica e a tensão de cedência (Baltazar et al., 2012b).

Quadro 3.4 - Características do superplastificante ^a

Nome comercial	Glenium Sky 617 (BASF)
Função	Reduzir a dosagem de água do grout Promover a fluidez do grout Evitar a floculação do grout
Estrutura do material	Policarboxilato
Cor	Castanho
Densidade	1,05
PH	8
Carga	Aniônica
Teor de íões Cloreto (%)	<0,10

^a Como indicado na ficha técnica do fornecedor

3.1.3. Meio poroso

Os materiais utilizados neste estudo para o meio poroso foram o material calcário e cerâmico, ambos lavados e secos em estufa. Posteriormente à fase de secagem foram peneirados de forma a conseguir-se os três intervalos de dimensões desejadas. Estas dimensões encontram-se descritas no quadro 3.5.

Quadro 3.5 - Composição granulométrica dos meios porosos em estudo.

Meio poroso	Grosso	Médio	Fino
A	1/3	1/3	1/3
B	2/3	0	1/3
E	1/2	1/2	0

Sendo:

Grosso: (9,5 mm – 4,75 mm)

Médio: (4,75 mm -2,0 mm)

Fino: (2,0 mm – 0,15 mm)

Material Cerâmico

O material cerâmico foi obtido através do esmagamento de tijolos cerâmicos furados. Da mesma forma que o material calcário, este foi lavado e levado à estufa. Posteriormente à fase de secagem foram peneirados de forma a obter-se os três intervalos de dimensões desejadas. Relativamente ao calcário, este apresenta uma massa volúmica inferior, percentagem de porosidade superior e uma menor velocidade de propagação de ultra-sons.

Material Calcário

O agregado calcário utilizado foi directamente obtido na pedreira, transportado em sacos, lavado e levado à estufa. Posteriormente à fase de secagem foram peneirados de forma a conseguir-se os três intervalos de dimensões desejadas. Este material pode ser chamado de brita e tem como principais características a elevada massa volúmica, reduzida porosidade e elevada velocidade de propagação de ultra-sons.

A obtenção dos três tipos de meio poroso, mais concretamente A,B e E, foi alcançada através dos 4 passos adiante indicados:

- 1-Peneiração
- 2-Diferenciação das partículas por dimensão
- 3-Esquartelamento
- 4-Obtenção do meio poroso

3.1.4. Silicose

O silicone utilizado em toda a campanha experimental, foi da marca Rubson com denominação SL3000 líquido.

As principais propriedades deste silicone podem-se enumerar da seguinte forma:

- Até 400% de elasticidade.
- Grande resistência aos raios UV, a intempérie e ao envelhecimento.
- Impermeável mesmo em terraços com água estagnada.
- Grande capacidade de enchimento.
- Permeável ao vapor de água.
- Mantém a flexibilidade a baixas temperaturas.
- Resiste a temperaturas extremas (-20°C a 80°C).
- Resiste a ataques pontuais de ácidos e bases diluídas.

- Limpeza das ferramentas apenas com água.
- Produto sem qualquer tipo de perigosidade.

Características técnicas:

- Base: silicone
- Aspecto: líquido pastoso
- Cores: preto, cinzento, branco e telha
- Massa volumica (20°C): aprox. 1,3 g/ml
- Temperatura de aplicação: entre 10°C e 30°C
- Resistência à chuva: após 3 - 7 horas
- Tempo de secagem: 2mm cada 24 horas

3.2. Procedimento da mistura

As misturas foram feitas no Laboratório de construção no departamento de Engenharia Civil num balde metalizado com uma capacidade de 5 litros, com 177 mm de diâmetro e 244 mm de altura, através de um berbequim dotado de uma lâmina de forma helicoidal.

A maioria das misturas foram feitas de junho a dezembro com uma temperatura ambiente de cerca de 20°C e uma humidade relativa de 60% podendo variar em cerca de 5%. A água utilizada na mistura encontrava-se à temperatura ambiente.

3.2.1. Grout sem silicone na sua constituição

O procedimento de mistura do grout foi feito de um modo semelhante ao que já havia sido feito [(Baltazar et, al 2012a), (Jorne et al., 2012a)].

Para que as misturas sejam o mais idênticas possíveis, estas foram sempre feitas com as mesmas quantidades. Para a realização desta mistura, o procedimento subdivide-se em duas partes. Numa primeira fase é adicionado manualmente no balde a cal hidráulica na sua totalidade (4 Kg) e 70% do total de água da mistura (1,4 Kg). De seguida é misturada cerca de 10 minutos aproximadamente a 2400rpm até que a textura da mistura fique visualmente pastosa. Na segunda fase é adicionado os 30% de água que restava (0,6 Kg) juntamente com o superplastificante diluído (1,2% do total da massa de cal), processo que demora por volta de 30 segundos, de forma a que não haja percas e se torne parte integrante da mistura tal como os autores [(Aiad, 2003), (Bjornstrom & Chandra, 2003), (Fernandéz-Altable & Casanova, 2006) (Heikal & Aiad, 2008)]. Por fim, deixa-se a misturadora trabalhar por mais cerca de 3 minutos a 2400 rpm para que se possa concluir a mistura.

É de referir que, ocorrendo o retardamento de 10 minutos na colocação do superplastificante, a mistura melhora a eficácia de dispersão das partículas, o que acontece devido ao facto de numa fase inicial de hidratação uma quantidade considerável de anidro ser gerada muito repentinamente. Se o superplastificante estiver presente, uma parcela deste fica parcialmente intercalada entre camadas de hidratos, permanecendo incapaz de exercer a acção dispersante das partículas de ligante [(Flatt & Houst, 2001) (Hanehara & Yamada, 2008)].

Quadro 3.6 - Composição do grout em estudo

Designação	HL5	Superplastificante	Relação Água/Ligante
Grout 1,2% SP	100%	1,20%	0,5

Solução de Silicone inserida no meio poroso

Relativamente à mistura mencionada em 3.2.1, esta será injectada num meio poroso pré-injectado com uma solução de silicone. Pode-se resumir o procedimento da seguinte forma; Depois do meio poroso estar preparado, foi pesada a dosagem de silicone e água a aplicar e utilizando novamente a misturadora criou-se a solução de silicone. De seguida esta solução foi introduzida no meio poroso e espalhada mediante o recurso a uma colher de pedreiro. Para que o silicone secasse e se tornasse parte integrante do meio poroso, o tabuleiro que os continha foi colocado na estufa por cerca de 5 a 7 dias a uma temperatura entre os 30°C e os 40°C. Finalmente ao retirar o tabuleiro da estufa, esperou-se algum tempo para que o seu conteúdo fique à temperatura ambiente e se proceda à injeção.

Quadro 3.7 - Composição das diferentes soluções de silicone em estudo

Traço	Água (g)	Silicone (g)
1:2	1000	500
1:4	1200	300
1:6	1285	215

3.2.2. Grout com silicone na sua constituição

A concepção desta mistura foi feita em três etapas. Numa primeira e de forma análoga ao que havia sido feito em 3.2.1, foi adicionado manualmente no balde 4Kg da cal hidráulica e 70% da quantidade de água na mistura (sendo a totalidade 2Kg) e é misturada cerca de 10 minutos aproximadamente a 2400 rpm até que a textura da mistura fique visualmente pastosa.

Numa segunda fase, adiciona-se o superplastificante e 10% da totalidade da água, processo que dura cerca de 30 segundos. Por fim é adicionada a solução de silicone com os restantes 20% de água e misturado por cerca de 3 minutos a 2400 rpm.

O Silicone como referido em 3.2.3 foi colocado na terceira e ultima fase do processo. Este é pesado juntamente com a água e misturado a montante da mistura do grout. É de notar que o traço de silicone utilizado na solução de grout com silicone foi sempre o mesmo ao longo desta dissertação (1:6 relativamente à quantidade de água).

3.3. Ensaios laboratoriais

3.3.1. Ensaio de injeção

As injeções realizadas no âmbito da presente dissertação advêm do seguimento de outras já realizadas para a tese de doutoramento de Jorne (2015).

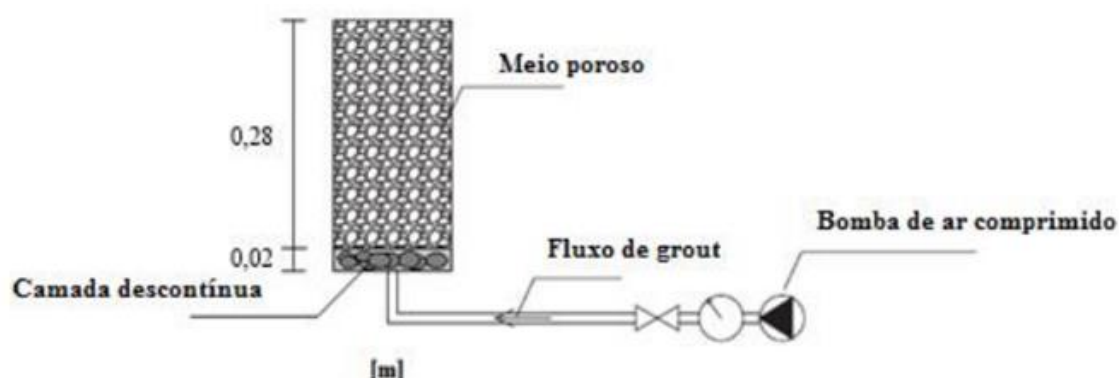


Figura 3.3 – Modelo teórico de como se procedeu a injeção. (adaptado de (Coelho, 2013))

Foram utilizados modelos representativos que simulam meios porosos integrantes do núcleo interno de alvenarias antigas. Foram criados modelos em PVC com 152mm de diâmetro e 300mm de altura onde eram colocados no seu interior os meios porosos para subsequente injeção.

As injeções de grout foram realizadas de acordo como mostra a figura 3.4 e de forma semelhante ao que já havia sido feito em trabalhos anteriores.



Figura 3.4 – Representação do processo de injeção.

Com o estudo de trabalhos anteriores apercebeu-se que pequenos problemas que ocorreram no passado relativamente ao processo de injeção. Concluiu-se que certas vezes as injeções não ocorriam da melhor forma. Tais ocorrências não eram devidas ao meio poroso, mas sim ao entupimento que por vezes ocorria no sistema de injeção, devido à permanência de partículas de grout que obstruíam o respectivo percurso no decurso do processo de injeção. Houve uma tentativa de melhorar todo esse sistema para que o grout pudesse fluir melhor, de molde a que, no caso de entupimento, se conseguisse acesso ao local de forma mais célere.

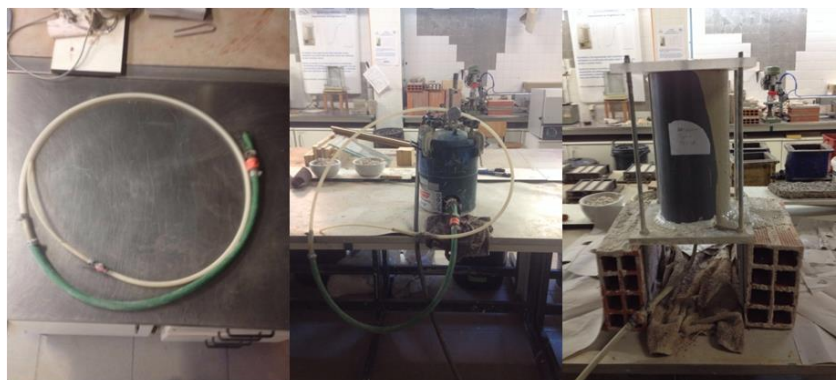


Figura 3.5 – Imagens com maior detalhe das modificações feitas entre a bomba de ar comprimido e o meio poroso.

Por outro lado, com vista a conseguir-se uma melhor performance a nível de número de injeções diárias foram criados novos moldes semelhantes aos antigos mas estes em madeira. É de notar que estes moldes, ao serem de madeira, possibilitaram posteriores modificações para as injeções referentes aos ensaios da coluna francesa no âmbito da dissertação do meu colega Eduardo Neno.

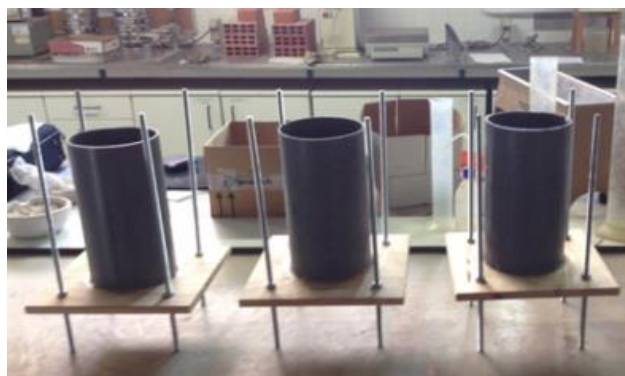


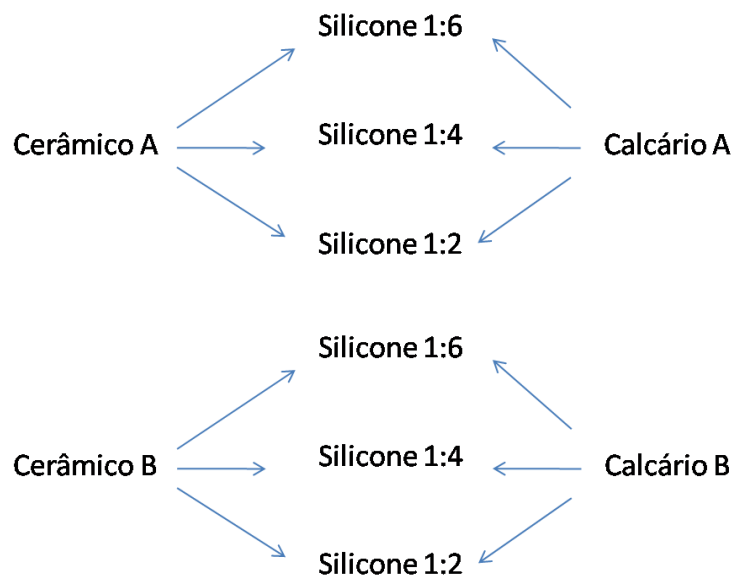
Figura 3.6 – Novos moldes em pinho para o processo de injeção do meio poroso.

Foi utilizada uma técnica desenvolvida por Jorne (Jorne et al., 2015b) onde se introduziu uma camada de sensivelmente 2cm de material calcário grosseiro para facilitar a injeção de grout. Esta camada localiza-se na base do cilindro a injectar junto ao local de entrada do grout. Desta forma, impede-se o adensamento de partículas do meio poroso nessa zona de molde a evitar distúrbios ou bloqueios à passagem do grout. No entanto, é de assinalar, que com a prática desta técnica está a facilitar-se a injeção de grout pois assim existe um maior número de vazios ligados entre si face a uma situação real no interior de um pano de alvenaria antiga (Binda et al., 2003a).

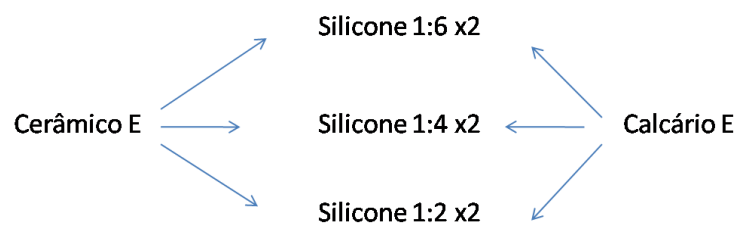
Como se pode observar pelas figuras antecedentes, as injeções foram realizadas de uma forma semelhante ao que já havia sido feito em trabalhos anteriores [(Binda et al., 2003a), (Van Rickstal, 2000)].

A injeção foi realizada tridimensionalmente da base para o topo do cilindro. Para que se conseguisse uma pressão constante de 1 bar (0,1 MPa) todas as injeções foram realizadas por duas pessoas, desta forma havia sempre uma pessoa a controlar a pressão. Todas as injeções foram realizadas com vista a poder estudar-se a injectabilidade do grout através dos vários meios porosos e mais tarde a sua resistência mecânica através de ensaios com o grout no estado endurecido. De seguida está representado em esquema para que seja mais fácil compreender as injeções feitas durante a campanha experimental.

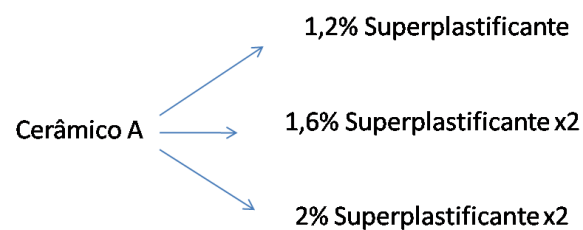
Injecções com pré-injecção de silicone no meio poroso e grout com 1,2% Superplastificante:



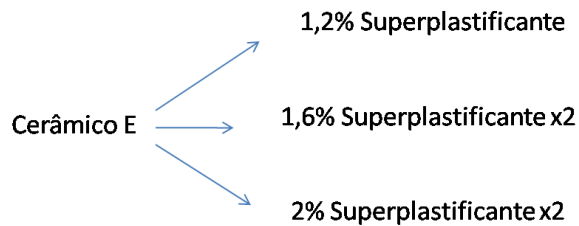
Relativamente às injecções com material cerâmico e calcário de tipologia E foram feitas a duplicar de forma a ter o número de provetes necessários a ser possível realizar ensaios de corte e de tracção por compressão diametral.



Injecções de grout com silicone na sua composição:



Cerâmico B → 1,2% Superplastificante



3.3.2. Ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons

O ensaio de ultra-som é uma técnica não intrusiva que recorre ao uso de ondas mecânicas ou acústicas aplicadas directamente no meio em estudo. O ultra-som propriamente dito, corresponde a uma onda mecânica longitudinal não audível pelos seres humanos por ter uma frequência acima dos 20 kHz. O ensaio baseia-se na definição da velocidade de propagação de um determinado impulso ultra-sónico entre dois pontos, tendo como finalidade a informação sobre as propriedades dos elementos ensaiados. Este ensaio, é expedito e eficiente, pois tem a capacidade de avaliar as características dos materiais de uma forma não intrusiva (Jorne et al., 2012b).

Esta técnica assenta no princípio de propagação de ondas elásticas, de acordo com a sua velocidade de propagação, esta, está sujeita às características elásticas do meio, sendo que será tanto maior quanto maior a densidade do material em questão, visto que a onda se propaga por vibração das partículas sólidas. Assim, com a variação da velocidade de transmissão da onda, é possível detectar mudanças significativas nas propriedades dos materiais ensaiados.

Este ensaio foi realizado em conformidade com a norma ASTM C597-02 e segundo o método de transmissão directa que consiste no posicionamento de dois transdutores em faces opostas do meio a ensaiar. Para que se conseguisse impedir bolsas de ar, foi utilizado um gel para ultra-sons, que funciona como agente de ligação entre os transdutores e as amostras.

O equipamento adoptado foi do tipo PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester) LAB da PROCEQ. Foi usado um transdutor cónico de 54 kHz, um valor de sinal emitido de 500V e o ganho máximo permitido pelo equipamento (100"x"), são segundo o estudo de Coelho as condições que permitem melhor resultado (Coelho, 2013).

A velocidade de ultra-sons foi obtida pela seguinte equação:

$$V = \frac{L}{T} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

sendo:

V – Velocidade de ultra-sons [m/s]

L – distancia desde o transmissor até ao receptor [m]

T – Tempo [s]

Para que a medição seja o mais precisa possível garantiu-se antes da medição um bom acoplamento entre o material a ensaiar e os transdutores. De modo a que as amostras não apresentem humidade no seu interior, foram colocadas por algum tempo na estufa a $60 \pm 5^\circ\text{C}$ e, posteriormente, em reserva fora da estufa até atingirem a temperatura ambiente. De seguida o ensaio foi realizado no intervalo de 5°C e 30°C para que não ocorressem variações de velocidade devido a valores de temperatura.

Provetes inteiros

De forma a analisar o provete no seu todo foi utilizada uma malha tal como é descrita na figura abaixo constituída por seis pontos em cada uma das quatro linhas longitudinais às amostras e perpendiculares com os topos. Estes pontos distam entre si 4 cm sendo que o ponto mais abaixo está a 6 cm da base do provete devido à camada grosseira descontínua que se encontra nos dois primeiros cm da base. Esta forma de analisar o provete foi desenvolvida por Jorne (Jorne et al., 2012b). É de notar que os resultados serão utilizados posteriormente nos tomogramas ultra-sónicos.



Figura 3.7 - Marcação e medição de velocidades ultra-sónicas em provetes inteiros.

Nas fatias

Posteriormente ao estudo feito na totalidade das amostras e após se recolherem todos os dados necessários à tomografia ultra-sónica, os provetes foram cortados em fatias tal como

representado na figura 3.8. Estes cortes tiveram origem a 2 cm, 10 cm, 18 cm e 26 cm relativamente à face inferior da amostra. Estes cortes deram origem a três fatias distintas: À base (fatia localizada entre os 2 e os 10 cm de altura do provete), ao meio (fatia localizada entre os 10 e os 18 cm de altura do provete) e, por fim, ao topo (fatia localizada entre os 18 cm e os 26 cm da altura do provete) sendo que a zona descontínua e a camada superior não foram consideradas.

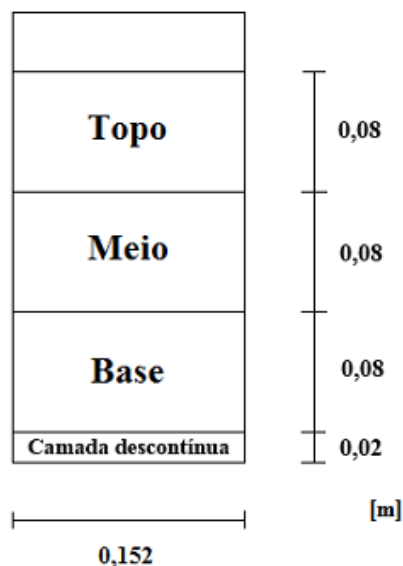


Figura 3.8 - Esquema representativo da localização dos cortes efectuados nos provetes (Guerreiro, 2014).

Para o corte, efectuado a húmido, foi feita uma marcação no local de corte do provete e posteriormente a sua fixação na máquina utilizada, JUMBO.



Figura 3.9 - Máquina JUMBO a realizar um corte a húmido num provete inteiro.

O objectivo de cortar os provetes em fatias é o de analisar as diferenças em altura do meio poroso injectado, o que permite obter uma melhor percepção da eficácia da injeção em função da altura da amostra.

A malha utilizada para o ensaio de ultra-sons das fatias foi a mesma que a utilizada por Coelho (2013) e Jorne (2012b; 2014). Encontra-se disposta em forma de pentágono e foi realizada no ensaio a meia altura das fatias como se pode observar na figura 3.10. De notar que as distâncias azuis têm um comprimento de 14,5 cm enquanto as marcadas a vermelho têm um comprimento de 8,9 cm).

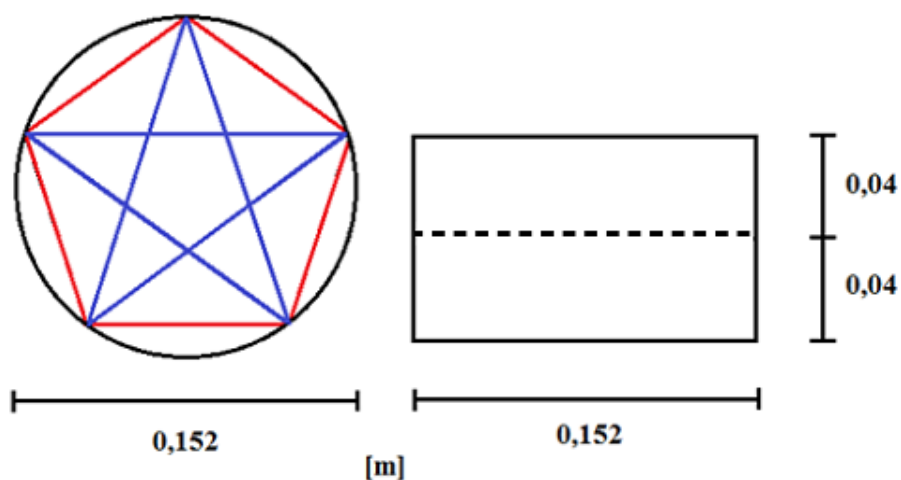


Figura 3.10 - Esquema da malha de ensaio de ultra-sons de cada fatia de provete inteiro: Vista de topo à esquerda e vista lateral à direita (Guerreiro, 2014).



Figura 3.11 - Marcação e medição de velocidades ultra-sónicas em bolachas.

3.3.3. Ensaio mecânicos

Ensaio de resistência à tracção por compressão diametral

Este ensaio foi realizado após o ensaio de ultra-sons em cada uma das fatias de amostras com uma máquina ZWICK/ROELL Z050 com uma célula de carga de 50 kN. Os parâmetros de

funcionamento do sistema de ensaio foram definidos com uma pré-carga de 100 N e uma deformação imposta de 0,7 mm/min.

Para que se possa realizar o ensaio de acordo com a norma C 496/C 496M-04 (American Society for Testing and Materials, 2004) é necessário que se conheçam as dimensões das amostras. Para tal foi usada uma craveira de modo a obter o diâmetro e a espessura médios de cada bolacha. Estes valores médios resultam da média de quatro medições quer de diâmetro (em quatro direcções diferentes) quer da espessura das fatias (em quatro zonas diferentes).

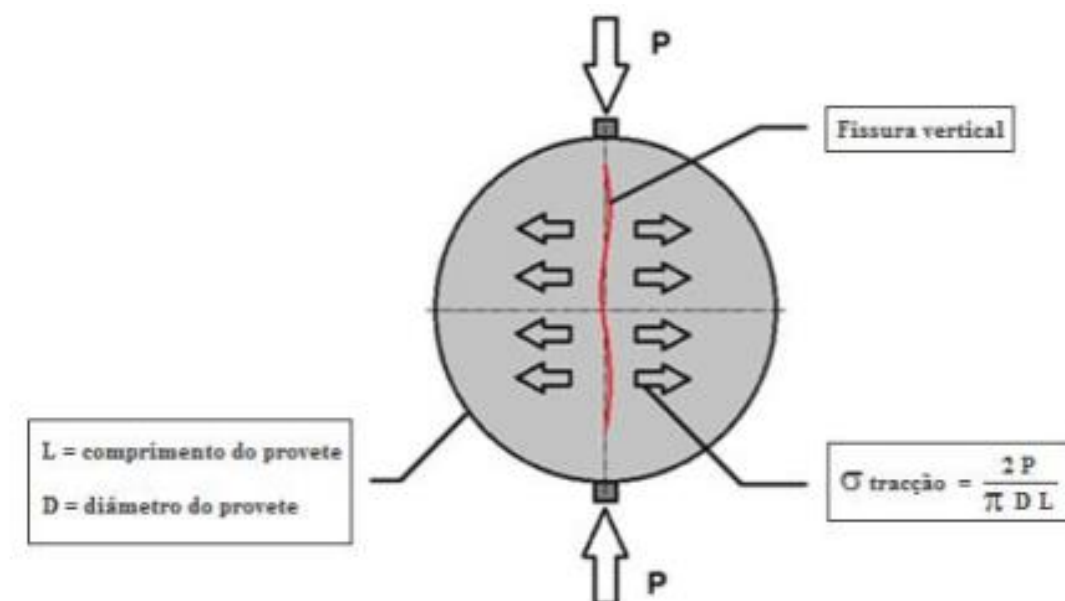


Figura 3.12 - Mecanismo de ruptura de um provete submetido ao ensaio de resistência à tracção por compressão diametral (Coelho, 2013).

Assim, o ensaio baseia-se na compressão de uma bolacha através da imposição da força em duas geratrizes diametralmente contrárias que, como resultado, origina o surgimento de tracções na direcção perpendicular à força aplicada e desta feita a chegada da ruptura do provete.

Resultante deste ensaio, retira-se a força de ruptura P e, com ela, procede-se ao cálculo da resistência à tracção por compressão diametral σ de acordo com a equação:

$$\sigma = \frac{2P}{\pi DL} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

onde:

σ – Resistência à tracção [MPa];

P – Força de ruptura [N];

D – Diâmetro do provete [mm];

L – Comprimento do provete [mm].

Ensaio de resistência ao corte

Relativamente ao ensaio de resistência ao corte, à semelhança do ensaio à tracção por compressão diametral, era igualmente necessário saber as dimensões das bolachas. Para tal foi usada uma craveira de modo a obter o diâmetro e a espessura médios de cada bolacha. Estes valores médios resultam da média de quatro medições quer de diâmetro (em quatro direcções diferentes) quer da espessura das fatias (em quatro zonas diferentes).

De seguida procedeu-se ao início do ensaio de corte (Shear Test) que consiste na aplicação de duas forças com a mesma direcção mas sentidos opostos e alinhamentos diferentes. Visto que a resultante de cada força é o centro de gravidade de semicírculos opostos em cada uma das faces obtém-se uma acção de faca que acaba por propiciar a ruptura na zona de corte (Guerreiro, 2014).

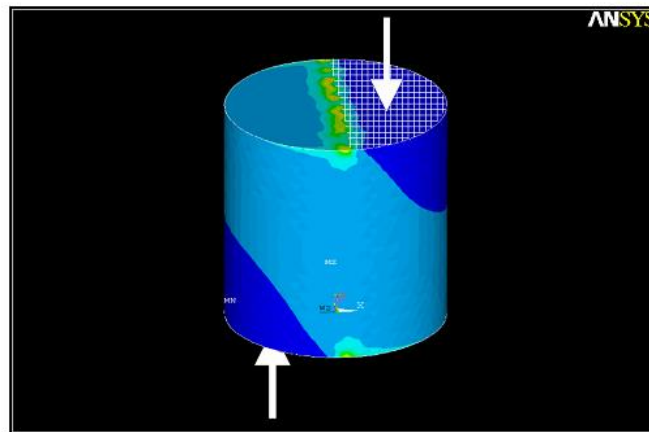


Figura 3.13 – Mecanismo de ruptura de um provete submetido ao ensaio de corte (Jorne, 2014).



Figura 3.14 - Representação de um ensaio de resistência ao corte a utilizar a máquina ZWICK/ROELL Z050.

Resultante deste ensaio, aferiu-se a força de ruptura F e, com ela, efectua-se o cálculo da resistência ao corte de acordo com a equação:

$$T_{corte} = \frac{F}{h D} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Onde:

T_{corte} – Resistência ao corte [MPa]

F – Força de ruptura [N]

h – Altura do provete [mm]

D – Diâmetro do provete [mm]

3.3.4. Tomografia ultra-sónica

Existe um leque de técnicas de análise não destrutivas de alvenaria. Na presente dissertação, optou-se pela escolha da tomografia ultra-sónica que tem provado ser uma das mais eficazes e com melhor resolução de qualidade de resultados [(Binda et al., 2003) (Jorne et al., 2014)]. Trata-se de uma técnica computacional que através de um método iterativo processa os dados recolhidos na superfície externa de forma a reproduzir a estrutura interna de um dado objecto (Binda et al., 2003). Através das velocidades ultra-sónicas retiradas aos provetes de que se falou anteriormente, estas, são imputadas num programa de computador que vai por sua vez desenvolver um modelo tridimensional de distribuição das velocidades (Schuller et al., 1997). Estes modelos, traduzidos em imagens, permitem perceber a localização das zonas dos provetes que se encontram mais compactas e menos compactas.

Estas imagens ou mapas podem ser apresentados em duas ou três dimensões, sendo que as zonas mais compactas associadas a uma velocidade ultra-sónica mais elevada e, ao invés, as menos compactas estão associadas a velocidades menos elevadas.

Para que seja possível aplicar esta técnica, existe um conjunto de medições ao nível da superfície dos provetes, seguindo uma malha que deve ser adequada ao material em questão, ao nível de dimensão e estado de compactidade. No presente caso foi utilizada a malha a que outrora se recorreu no ensaio de ultra-sons para provetes inteiros (Guerreiro, 2014).

O programa utilizado para processar as velocidades ultra-sónicas registadas nos provetes foi o GEOTOMCG através dos sistemas operativos actuais, já utilizado anteriormente por Guerreiro (2014) e Telha (2015). Este software apresenta tomogramas a 3D de qualidade, porém, comparativamente com o de 2D, o que se constata é que este último, não é capaz de fornecer resultados com tão boa resolução, tomando uma forma demasiado geométrica, o que não traduz da melhor forma o que realmente existe no interior do provete. Por essa razão, foi utilizado um programa gráfico apelidado por SURFER, com o intuito de se conseguir melhorar a qualidade de resolução dos tomogramas de duas dimensões.

De forma a se obter os tomogramas ultra-sónicos como anteriormente já foi referido, foi utilizado um método iterativo chamado SIRT que significa Simultaneous Iterative Reconstruction Technique onde se definiram no total 15 iterações. Este método realiza uma inversão de dados que desencadeia um campo de velocidades na secção transversal da amostra. Os cálculos através do SIRT são baseados numa grelha rectilínea tridimensional de pontos, com elementos de volume de intervenção ou voxels. Os valores de velocidade são especificados nos pontos e calculados dentro de voxels por interpolação linear múltipla. Ademais, no material elástico imperfeito, o decréscimo intrínseco provoca uma queda exponencial da amplitude da onda que tem a maior distância a partir do ponto de origem, isto porque as ondas perdem alguma energia devido ao atrito interno (dependendo da magnitude da perda das propriedades físicas no meio (Buyukozturk, 1998)). Desta forma é de salientar que a grelha mais apertada de medições utilizada, permitiu caracterizar com maior precisão a forma dos vazios, originando uma resolução mais nítida, com o inconveniente de implicar longas durações e tempos computacionais. Esta reflexão combina bem nos resultados obtidos por autores como Concu (2010a; 2010b) e Cantini (2012), entre outros. O ultimo autor referido percebeu a influencia da densidade do mapa de Ray Path, que depende directamente da malha escolhida, com ênfase para o melhoramento de alguma redundância para uma melhor resolução dos tomogramas, o que tem como consequências, por um lado, uma diminuição acústica no mapa de velocidades e, por outro, uma melhoria na detecção das heterogeneidades locais.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Introdução

O Presente capítulo foca-se na apresentação e análise dos resultados referentes aos ensaios de injeção, tomografia ultra-sónica, resistência à tracção por compressão diametral e corte. O objectivo será estudar a relevância da acção do hidrófugo de superfície na alteração do ângulo de contacto da injectabilidade do grout, de modo a que este reduza o efeito de absorção de água pelo meio poroso, tanto quando este é introduzido no meio poroso ou directamente na amassadura.

De modo a que se possam retirar ilações com o maior grau de rigor e acerto possíveis, serão feitas comparações tendo em conta as variáveis utilizadas como a granulometria, tipo de material, dosagens de silicone e superplastificante e método de aplicação do hidrófugo de superfície.

4.2. Avaliação da consolidação do grout sem silicone em vários meios porosos

4.2.1. Ensaio de injeção

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados relativos à injectabilidade das três granulometrias utilizadas para cada tipo de material cerâmico e calcário onde o tratamento hidrófugo foi aplicado através do meio poroso. É de relembrar que o grout utilizado nesta fase da campanha experimental foi sempre o mesmo, com 1,2% de superplastificante que já havia sido alvo de estudos anteriores e apontado como o mais adequado para este tipo de ensaio (Telha, F., 2015) (Jorne, F., 2016). O principal objectivo deste ensaio será avaliar a performance do grout na injectabilidade consoante a dosagem de silicone e os diferentes meios porosos. É de referir que a granulometria A e B apresenta maiores dificuldades de penetração ao grout, face à granulometria E. Outra questão não menos importante a analisar será perceber até que ponto com níveis de injeção mais elevados (valores esperados na granulometria E) se conseguem obter níveis de resistências mecânicas superiores.

Encontram-se os resultados da injectabilidade referente às várias granulometrias do material cerâmico no quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Resultados dos ensaios de injectabilidade relativamente aos meios porosos cerâmicos.

Cerâmico A	
Traço de silicone	Injectabilidade
1:6	0,62
1:4	0,61
1:2	0,72
Cerâmico B	
Traço de silicone	Injectabilidade
1:6	0,65
1:4	0,69
1:2	0,76
Cerâmico E	
Traço de silicone	Injectabilidade
1:6	0,87
1:4	0,87
1:2	0,93

No que diz respeito ao material cerâmico, é visível que com uma maior quantidade de hidrófugo, mais concretamente no traço 1:2, se obteve indubitavelmente uma maior injectabilidade nas três granulometrias estudadas. Para que se possa compreender da melhor forma a razão pela qual tal acontece é importante rever algumas noções atrás explicadas.

O grout quando em contacto com o meio poroso, sem o tratamento hidrófugo, tem um comportamento molhante, isto é, o ângulo de contacto formado entre o grout e a parede do poro é inferior a 90°, traduzindo-se em forças de atracção do grout às paredes do poro superiores às forças de coesão do próprio grout. Vista esta situação através da equação de Young-Laplace, para ângulos de contacto inferiores a 90°, dar-se-á origem a maiores valores de pressão de sucção capilar por parte dos poros o que leva a uma maior perda de água constituinte do grout para as paredes do poro. Esta situação, no limite, leva à diminuição do escoamento e à obstrução dos poros, o que se traduz num insucesso da injeção.

Neste caso concreto para que se consiga uma boa injeção e se contrarie o comportamento molhante do grout, foi feito um tratamento hidrófugo de superfície no meio poroso a injectar, para que se conseguisse obter um ângulo de contacto com a superfície porosa superior a 90° e o grout

apresente um comportamento não molhante. Desta forma são esperadas forças de atracção do grout às paredes do poro inferiores às forças de coesão do próprio grout, dando origem a um desempenho hidrófobo. Ao examinar esta situação através da equação de Young-Laplace com um ângulo de contacto superior a 90° passa a não existir o fenómeno de sucção dando ocorrência à repulsão e a uma tensão superficial descendente. Assim, resulta numa melhor fluidez por parte do grout devido à maior retenção de água na sua constituição e ao sucesso da injeção.

Ao comparar as granulometrias em estudo, conseguiram-se valores de injectabilidade visivelmente superiores na tipologia E, de seguida na B e por fim no tipo A. Relativamente à equação de Young-Laplace é relevante relembrar que para poros com diâmetros superiores, obtêm-se valores de sucção inferiores, o que implica menor perda de água livre do grout e consequentemente melhores injeções. Assim quanto mais partículas finas houver na constituição de um meio poroso (caso do tipo A), maior é a área de superfície de contacto da parede dos poros e, consequentemente, uma maior resistência ao fluxo de grout. Com a alteração do ângulo de contacto através da introdução da solução de silicone, conseguem-se bons resultados de injeção para a granulometria A. No entanto, o grout quando deparado com poros de menor dimensão tem ainda alguma dificuldade em penetrar. Muitas vezes tal acontece associado a um fenómeno chamado filtração do grout “filtration tendency”, sendo que este fenómeno ocorre quando um aglomerado de partículas de grout se acumula na entrada ou no interior dos poros ou vazios, impedindo o fluxo de grout e a penetração adicional [(Eklund & Stille, 2008); (Jorne et al., 2015b)]. Assim, o grout terá de procurar diferentes caminhos com poros de maiores dimensões, o que explica também o facto de todas as injeções terem chegado ao topo dos provetes embora com quantidades de grout significativamente diferentes.

Face aos 3 traços de silicone utilizados, pode-se observar que o traço que contém mais silicone é manifestamente o que obteve melhores resultados em todos os tipos de granulometria, isto porque com o tratamento, nos locais do meio poroso onde há silicone, a pressão de sucção capilar é menor, perdendo assim o grout menos água da sua constituição o que origina uma melhor injectabilidade.

É curioso também observar que relativamente ao traço 1:4 e 1:6 os resultados são muito próximos uns dos outros, o que se pode explicar pelo facto das quantidades de silicone serem igualmente próximas e pelo método de preparação onde podem existir algumas perdas que conduzem a resultados semelhantes.

Quadro 4.2 - Resultados dos ensaios de injectabilidade relativamente aos meios porosos calcários

Calcário A	
Traço de silicone	Injectabilidade
1:6	0,65
1:4	0,67
1:2	0,78
Calcário B	
Traço de silicone	Injectabilidade
1:6	0,81
1:4	0,80
1:2	0,85
Calcário E	
Traço de silicone	Injectabilidade
1:6	0,90
1:4	0,91
1:2	0,95

Relativamente às amostras calcárias, à semelhança do material cerâmico, obtiveram-se melhores injeções nas granulometrias com maior diâmetro de poros, sendo que no tipo E houve injectabilidades muito próximas da unidade. Pode também observar-se que com o tratamento 1:2 de silicone (maior quantidade de silicone) se obteve melhores injeções, devido ao incremento do ângulo de contacto. Os resultados de injectabilidade dos tratamentos com traços 1:4 e 1:6 foram reforçados ao serem mais uma vez muito próximos o que indica que a diferença de silicone utilizado não é traduzido na diferença de ângulo de contacto entre um caso e o outro.

Comparação de amostras cerâmicas e calcárias

Relativamente aos resultados das amostras cerâmicas vs calcárias, é importante relembrar que se manteve tanto os tipos de granulometrias (A, B e E) como os traços de silicone (1:2, 1:4 e 1:6) sendo o material, o único elemento diferenciador.

O material calcário face ao cerâmico é menos poroso, tendo as forças de sucção do grout às paredes dos poros inferiores o que se traduz num menor efeito de sucção da água constituinte do grout. Na prática, os resultados obtidos mostram isso mesmo, não sendo perdida tanta água livre do grout, existe uma maior injectabilidade em todas as injeções relativamente aos provetes cerâmicos.

4.2.2. Tomogramas ultra-sônicos

Relativamente a este subcapítulo são apresentados os tomogramas ultra-sônicos bem como a análise dos seus resultados. Esta é feita consoante o tipo de material, a variação do ângulo de contacto proveniente das diferentes proporções da solução de silicone no meio poroso e a respectiva secção horizontal em questão (base, meio e topo).

Devido à quantidade elevada de ensaios realizados foi decidido apresentar apenas um modelo que melhor elucida a realidade de cada secção.

Amostras Cerâmicas

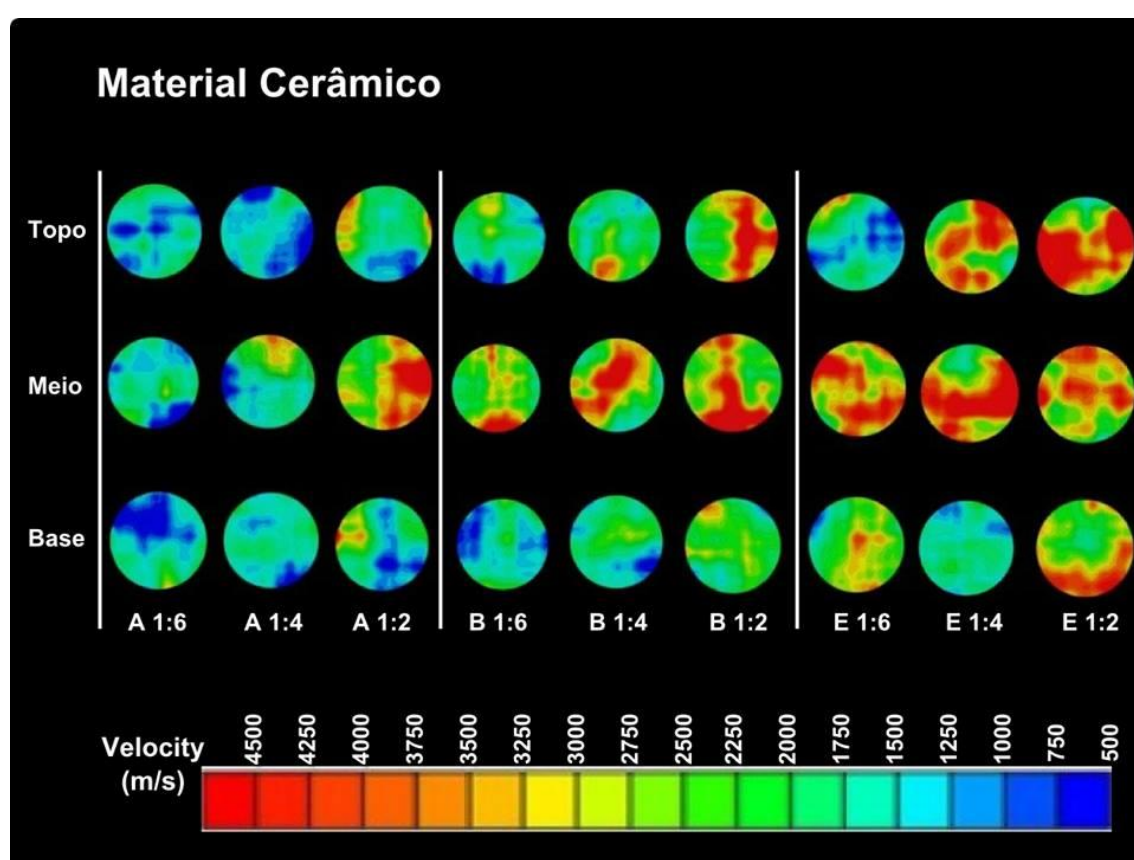


Figura 4.1 - Tomogramas ultra-sônicos referentes às injeções de grout em meio poroso cerâmico pré-injectado com soluções de silicone 1:2; 1:4 e 1:6.

Ao analisar as amostras do material cerâmico de granulometria A, representadas na figura 4.1, através de uma visão generalizada, pode-se observar tendências idênticas para as várias dosagens de silicone no que diz respeito à variação de velocidades de ultra-sons em função da altura nas passagens das secções horizontais base-meio e meio-topo. Na primeira passagem, estas apresentam-se com variações positivas sendo que nas últimas com tendências opostas.

Relativamente à amostra referente à dosagem 1:6 de silicone, esta é aquela que apresenta na secção de base valores mais baixos de velocidades ultra-sónicas apontando para uma menor

consolidação e naturalmente uma maior quantidade de vazios. Para esta amostra, é possível observar que a injeção teve possibilidade de ocorrer através de um dos cantos da bolacha, assumindo valores na ordem dos 2250 m/s o que deu origem a uma ligeira melhoria na compactidade da secção central e topo. No entanto, para este provete, em todas as secções foram obtidos resultados não homogéneos e com sintomas da existência de bastantes vazios.

No que diz respeito às dosagens de silicone seguintes e ainda referentes à granulometria A, ficam vincadas as variações de velocidades de ultra-sons base-meio positivas e meio-topo negativas com valores respectivamente proporcionais no que diz respeito à quantidade de silicone apresentada, sendo que é notável o valor de compactidade conseguido na secção média para o traço 1:2 de silicone.

O material cerâmico A sendo constituído por vazios de menor dimensão (quando comparados com as outras tipologias em estudo), torna determinante a capacidade do grout percolar da melhor forma, não conseguindo atingir os melhores valores e apresentando resultados heterogéneos mesmo quando é aplicada uma dosagem mais elevada de silicone. Ainda assim é visível uma clara melhoria em todas as secções do provete quando ao comparar os traços de silicone 1:6 e 1:2, sendo proporcional o grau de compactidade atingido consoante a quantidade de silicone inserida no meio poroso.

Ao observar a granulometria B a mesma variação negativa nas passagens base-meio e positiva meio-topo aconteceu, desta vez para as soluções 1:6 e 1:4 de silicone. Tal como tinha acontecido na análise anterior, a secção de base da granulometria B de traço 1:6, apresenta os valores de velocidades de ultra-sons mais baixos do conjunto, ainda assim sendo mais elevados face aos de granulometria A, ao mostrar um provete mais compacto mas, ainda assim, heterogéneo.

Ao analisar os resultados do traço 1:4, estes apresentam valores algo superiores aos do seu antecedente (solução de silicone 1:6), principalmente na secção central.

Relativamente ao provete com maior dosagem de silicone, é notável uma grande melhoria nesta, não tanto nas secções de base e meio face às anteriores mas sim na de topo, sendo indicativo de que a maior quantidade de silicone presente no meio poroso e o facto da dimensão dos poros do meio poroso B ser algo superior à do meio A, torna possível o ligante atingir alturas superiores e, consequentemente, obter-se uma melhor compactidade da secção de topo.

Ao observar a granulometria E, como seria de esperar devido à dimensão dos poros deste meio poroso, foram retirados valores de velocidades de ultra-sons bastante promissores para os futuros ensaios de resistência mecânica, visto este ser aquele que mais facilita a percolação da suspensão de grout.

As bases das amostras de soluções 1:6 e 1:4 apresentam-se quase idênticas entre elas sendo notável uma melhoria face às correspondentes da granulometria A e B. Este facto vem comprovar o expectável de que para poros de maior dimensão, existe uma maior facilidade de percolação do

ligante. A base e topo do exemplar referente à dosagem 1:2 apresentam os melhores resultados das secções em questão até agora analisados, que comprova a eficácia do uso do hidrófugo de superfície.

Depois de serem analisadas em pormenor todas as granulometrias do material cerâmico, ao contrário do que se poderia esperar, não foram as secções de base que apresentaram os melhores valores de compactação. Tal situação pode dever-se a alguma turbulência nessa secção, ao facto de ser uma zona de descontinuidade devido à brita colocada na base do provete e também pelo teor de água ligante do grout na base ser mais elevado. Relativamente a esta ultima razão apontada, pensa-se que poderá ter influências mais directas nos ensaios de resistência mecânica.

A variação do ângulo de contacto consoante a dosagem de silicone fez-se sentir de uma forma positiva à medida que esta aumentava, ao contrariar os efeitos de bloqueio por parte do meio poroso principalmente nas granulometrias de porometria de menor dimensão. De uma forma geral, a compacidade apresentada nas secções não foi homogénea, talvez devido ao facto do silicone não se apresentar de uma forma igualmente uniforme no meio poroso por mais que se procure experimentalmente que tal suceda.

Amostras calcárias

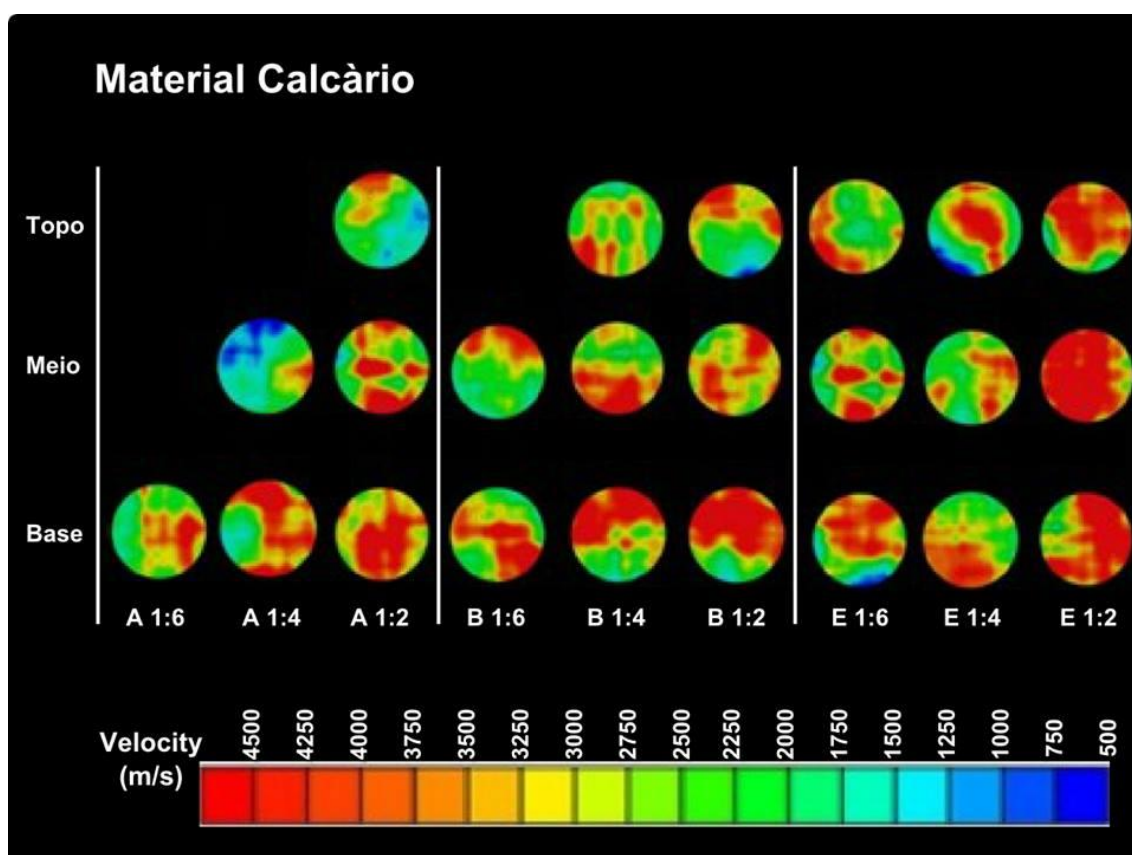


Figura 4.2 - Tomogramas ultra-sónicos referentes às injeções de grout em meio poroso calcário pré-injectado com soluções de silicone 1:2; 1:4 e 1:6.

Relativamente às amostras calcárias e ao começar pela análise da tipologia A, devido à fraca qualidade da ligação grout - meio poroso, não foi possível analisar um único provete completo, isto é, as secções horizontais dos centros ou topos desfizeram-se na fase de descofragem.

Ao começar pelo traço de menor quantidade de silicone, sendo que apenas temos um exemplar referente à base, pode-se assumir que a variação das velocidades de ultra-sons em função da altura foi negativa. Ainda assim, a bolacha inferior analisada demonstrou cores indicativas de velocidades moderadamente elevadas, face à granulometria e solução de silicone em questão.

Relativamente à quantidade de silicone 1:4, esta apresenta mais uma vez uma variação negativa das velocidades de ultra-sons em função da altura do provete, sendo que a base mostra tons avermelhados que se perdem para a secção média.

A amostra com maior quantidade de silicone foi a única que se mostrou passível de uma injeção até ao topo do provete, ou melhor, que as secções de maior altura não se desfizeram na descofragem. Esta obteve valores de ultra-sons bastante elevados na base com ausência de tonalidade azul o que indica a inexistência de vazios. Existiu perda de compactação na passagem do grout da secção de base para a secção central, no entanto, esta apresenta uma ínfima quantidade de tonalidade azul sendo que na sua maioria o verde e o vermelho são as cores que melhor representam a secção. A passagem entre as secções meio-topo teve igualmente uma variação negativa explicada pela perda de água livre do grout que dificultou a subida da suspensão.

No que diz respeito ao meio poroso B, pode-se observar melhores resultados face aos analisados previamente na granulometria A, principalmente nas pré-soluções 1:6 e 1:4, sendo que apenas a secção de topo da menor dosagem de silicone não foi passível de ser analisada, podendo-se afirmar uma variação negativa de velocidade de ultra-sons intimamente ligada à falta de hidrófugo de superfície.

Relativamente ao provete de dosagem média de silicone é possível ver pela primeira vez uma secção de topo com valores de compacidade indicativos de uma quantidade considerável de suspensão ter atingido o topo de forma a não existir quantidades significativas de tonalidades azuis, sendo este constituído por tons verdes amarelos e avermelhados.

É igualmente notável que mais uma vez no material calcário existe uma variação negativa da velocidade de ultra-sons relativamente a toda a altura do provete. No entanto, esta não é muito acentuada, obtendo uma secção de topo com valores em determinados locais de 4000m/s. Relativamente à dosagem 1:2 de hidrófugo de superfície, de uma forma geral o provete apresenta-se com uma média de valores próximos da solução 1:4, não se sentindo neste caso particular melhorias pela maior quantidade de silicone.

No que se refere ao meio poroso E e para os traços 1:6 e 1:4, são apresentados valores bastante aceitáveis no que respeita à compacidade/velocidade de ultra-sons, sendo que para o

provete de maior quantidade de ultra-sons foram atingidos recordes face aos analisados até ao momento, não só na compacidade apresentada bem como na homogeneidade da secção central. Tal situação leva a crer que para que exista um provete com elevada homogeneidade é necessária uma óptima injeção que depende directamente do meio poroso em questão, devido à boa percolação da suspensão e da quantidade de silicone utilizada para que exista uma boa retenção de água.

Amostras cerâmicas vs amostras calcárias

Resumindo a análise anterior e fazendo uma comparação entre os resultados de material cerâmico e calcário, pode-se observar uma maior turbulência nas amostras cerâmicas, mais concretamente na secção de base o que leva a crer que influenciou uma tendência mais bem definida na variação de velocidades de ultra-sons (base-meio positiva e meio topo negativa). Esta tendência nas amostras calcárias por secção não é tão bem definida, no entanto, globalmente, pode-se afirmar que em função da altura a compacidade das amostras diminui.

Tendo presente que os valores de velocidades de ultra-sons mais baixos, traduzindo uma menor compacidade das amostras, são apresentados em tons azulados e os mais compactos em tons avermelhados, concluiu-se que em ambos os meios porosos a tonalidade azulada tinha tendência a aparecer em maior quantidade em função da altura dos provetes. Por outro lado, foi igualmente possível observar que o material cerâmico se demonstrou ser menos passível de penetrar pela suspensão do que o material calcário. Este reparo indica indícios de maior porosidade nas partículas cerâmicas e maior efeito de sucção que leva a uma maior obstrução do grout neste material. Os tons azulados são mais perceptíveis nas bases e topos da tipologia A e B, respectivamente.

É importante referir que mesmo com velocidades mais baixas no material cerâmico foi possível analisar todos os provetes, algo que não aconteceu no material calcário, facto atribuído à má ligação grout - meio poroso perceptível na fase de descofragem.

Na grande maioria dos casos tanto para o material cerâmico como para o calcário é visível uma baixa homogeneidade de valores, com excepção do provete calcário de tipologia E traço 1:2 que demonstrou grande facilidade de penetração até ao topo do mesmo.

O silicone inserido no meio poroso em maior quantidade ao aumentar o ângulo de contacto, apresenta uma grande vantagem face às suas menores dosagens em todos os meios porosos analisados, sendo que os melhores resultados tomográficos foram no meio poroso E estando este facto directamente ligado ao tamanho dos vazios facilitarem a percolação do grout.

Apuraram-se indícios de maiores compacidades no material cerâmico nas secções médias, facto que pode estar relacionado com a maior absorção de água deste material na secção de base. A diminuição do teor de água/ligante na secção média, permitiu assim obter bolachas mais

compactas nessa zona. Relativamente ao material calcário, este apresentou tons mais avermelhados nas secções de base.

Os traços de menor quantidade de silicone apresentaram resultados mais fracos mas dentro dos valores que eram expectáveis, sendo que a solução 1:4 de silicone se situava entre os restantes.

4.2.3. Ensaio de resistência à tracção por compressão diametral

No que respeita ao ensaio de resistência à tracção por compressão diametral para as amostras com pré injeccção de solução de silicone, através do meio poroso, optou-se por se estudar os meios porosos E tanto para as amostras cerâmicas como para as calcárias. Esta granulometria ainda não havia sido estudada com a pré-injecção de silicone. No entanto, desta forma e considerando que têm melhores injectabilidades, tem-se uma melhor ideia do tipo de resistências à tracção que se podem esperar em injeccções de sucesso. Com este ensaio é possível ter uma ideia mais clara da influência do silicone na resistência mecânica do meio poroso injectado.

Material cerâmico

Quadro 4.3 – Resultados dos ensaios de resistência à tracção por compressão diametral – Material cerâmico de granulometria E.

Material cerâmico E - Resistência à tracção (MPa)				
Traço de silicone	Base	Meio	Topo	Média
1:6	0,241	0,247	0,166	0,218
1:4	0,376	0,391	0,273	0,347
1:2	0,413	0,523	0,341	0,426

Para o material cerâmico E, é possível observar que, em termos de médias, quanto mais quantidade de silicone foi dissolvido no meio poroso maior foi a resistência à tracção obtida. O mesmo é dizer que, quanto maior o ângulo de contacto obtido através da pré-injecção de hidrófugo de superfície, maiores resistências se obtiveram em média nas bolachas, o que pode ser contrário do que se havia de esperar.

Ao observar agora e de uma forma mais minuciosa a situação referente à injeccção com traço de silicone 1:6, o que se constata é a existência de valores semelhantes na fatia da base e meio, sendo que na fatia de topo se regista um valor de cerca de 30% inferior. Estes valores podem ser explicados pelo facto do grout, ao ser injectado na fatia inferior (base) e à medida que a injeccção prosseguia, ao passar pela fatia do meio, este ia perdendo água livre da sua constituição, por efeito de sucção, sendo que esta ocorrência deu origem a menores valores de resistência no topo por falta de água livre do grout e consequente pior penetração no meio poroso.

Relativamente às injeções com traços de silicone de 1:4 e 1:2, respectivamente, consegue-se observar exactamente o mesmo fenómeno, ou seja, uma maior resistência nas secções base e meio e uma menor resistência na secção de topo.

Outro dado interessante a observar é o valor da bolacha inferior do traço 1:2 ser cerca de 10% inferior ao do meio, ao contrário do que havia sido sucedido nas outras soluções de silicone. Penso que relativamente a esta ocorrência e no âmbito de um futuro estudo, seria interessante, para valores de soluções de silicone na ordem de 1:2 neste meio poroso, proceder-se à injeção, mas com pressão ligeiramente menor, com o objectivo de permitir que o grout tenha mais tempo de penetrar nos poros de menores dimensões da bolacha inferior.

Material calcário

Quadro 4.4 - Resultados dos ensaios de resistência à tracção por compressão diametral – Material calcário de granulometria E.

Material calcário E - Resistência à tracção (MPa)				
Traço de silicone	Base	Meio	Topo	Média
1:6	0,285	0,269	0,221	0,258
1:4	0,214	0,301	0,215	0,243
1:2	0,202	0,465	0,331	0,333

No que diz respeito às amostras calcárias e numa visão geral das médias referentes à resistência à tracção por compressão diametral, observa-se que o valor mais elevado é atingido pelo provete que apresenta um traço de silicone maior, como, aliás, já havia sido registado igualmente nas amostras cerâmicas. Em relação às resistências referentes aos traços de silicone 1:6 e 1:4, estes encontram-se, em média, bastante próximos, com uma ligeira superioridade para o traço de menor quantidade de silicone (1:6). Esta diferença sendo tão diminuta pode dever-se ao facto do corte das bolachas não ter sido tão preciso ou, devido a alguma deformação, designadamente, das fatias de base ou topo do traço 1:4 que apresenta um valor abaixo do esperado.

É de notar que, tal como tinha sucedido no meio poroso E com traço 1:2 do meio cerâmico, as amostras de material calcário com traço 1:4 e 1:6 apresentam valores de resistência à tracção nas fatias de base inferiores às do meio. É possível que o material calcário incremente essa tendência devido ao facto de existir um menor efeito de sucção de água do grout por parte do meio poroso, e assim para o valor de pressão utilizado nas injeções, o grout tenha pouco tempo e menor facilidade de preencher os poros de menor diâmetro, percolando na base do provete de uma forma mais directa.

É de igualmente de salientar que também os valores de resistência mais altos registados nos 3 ensaios, foram os das bolachas de meio sendo que os valores das bolachas de topo são inferiores a estes.

Com estes resultados consegue-se concluir que tal como no material cerâmico, as resistências são incrementadas quando o ângulo de contacto é igualmente aumentado através de soluções com maiores quantidades de hidrófugo. Por outro lado, mesmo no caso onde o traço de silicone é superior (1:2) existe uma quantidade de perda considerável da água constituinte do grout, o que leva a menores compacidades e, consequentemente, menores resistências na fatia de topo.

Amostras cerâmicas vs amostras calcárias

Ao observar os resultados obtidos, apurou-se, em média, melhores resultados para o material cerâmico nos traços 1:2 e 1:4, sendo que são cerca de 22% e 30% acima, respectivamente, dos valores retirados nos mesmos ensaios com material calcário. No caso do menor traço de silicone (1:6) o material cerâmico obteve uma melhor média de resultados, mas ainda assim não tão significativa, sendo que esta diferença se fez sentir, essencialmente, na bolacha inferior e superior.

Estas mudanças de comportamento devem-se ao facto de existir uma alteração na superfície de material de suporte no conjunto grout/meio poroso. Existem, portanto, diferenças nas características intrínsecas dos materiais em causa (cerâmico e calcário) que têm consequências na ligação entre o grout e o meio poroso.

Relativamente ao material cerâmico, este provou ter uma maior eficácia principalmente para os traços com maior quantidade de silicone, o que sugere uma melhor ligação de grout meio poroso.

Conforme já foi referido, as ligações entre o grout e o meio poroso não são iguais, em virtude dos meios porosos serem constituídos por materiais diferentes, existindo, no caso das amostras cerâmicas, uma superior adesividade das partículas de grout face ao material calcário. *“Nestas zonas de interface ocorre um fenómeno químico, no qual não existe libertação de iões da superfície porosa susceptíveis de combinar com os iões derivados da hidratação do grout”* (Jorne et al, 2015b), (F. Telha, 2015). Por consequência, neste caso, existe uma simples deposição das partículas de ligante sobre a superfície do meio poroso o que origina uma pior resistência mecânica, comprovada nos ensaios supracitados. Este fenómeno fez-se sobrepor ao facto do material calcário ter conseguido injectabilidades superiores face aos cerâmicos.

Como dado conclusivo em todos os ensaios de resistência realizados neste subcapítulo, pode-se afirmar que para o traço 1:2 de silicone (maior dosagem de hidrófugo), na granulometria

E, se conseguiram melhores resultados de resistências à tracção. Contrariamente ao que se poderia pensar e devido ao facto de haver maior quantidade de silicone, isto é, de existir uma maior camada de hidro-repelência, esta não veio danificar a ligação entre o ligante e o meio poroso. Pode-se então concluir que o maior volume de grout injectado no espaço interparticular impera sobre a possível perda de ligação na interface grout/meio poroso.

4.2.4. Ensaio de resistência ao corte

Neste subcapítulo da dissertação ir-se-ão analisar os resultados relativos ao ensaio de resistência ao corte para as amostras injectadas com a pré-solução de silicone.

Como já foi referido anteriormente na campanha experimental, o ensaio de corte consiste na aplicação de duas forças com a mesma direcção, sentidos opostos e um eixo distinto.

Amostras cerâmicas

Ao observar os resultados representados nos quadros 4.5, 4.6 e 4.7, constata-se, no essencial, que as médias de resistências ao corte aumentam consoante aumenta a granulometria do meio poroso em causa. Por outro lado, o mesmo acontece à medida que se tem mais silicone pré injectado no meio poroso, ou seja, à medida que o traço de silicone aumenta.

Quadro 4.5 - Resultados dos ensaios de resistência ao corte – Material cerâmico de granulometria A.

Material cerâmico A - Resistência ao corte (MPa)				
Traço de silicone	Base	Meio	Topo	Média
1:6	0,080	0,112	0,085	0,092
1:4	0,206	0,498	0,107	0,270
1:2	0,349	0,674	0,350	0,458

Relativamente ao meio poroso A, onde a injectabilidade foi mais afectada devido ao maior número de partículas finas, pode-se comprovar que houve repercussões negativas na resistência ao corte. Ainda assim, no traço com maior quantidade de silicone, conseguiu-se um resultado médio aceitável, sendo que a injeção teve valores semelhantes na base e topo, o que pode estar relacionado com o facto de a turbulência do grout na secção de entrada ter prejudicado a sua resistência final quando em estado endurecido. O valor de resistência da base acaba por estar em consonância com o de topo, embora este, se deva principalmente ao tipo de granulometria que o grout tinha de percolar (granulometria com menor porometria em estudo). Já a secção média da solução de 1:2 de silicone, apresenta resultados bastante bons, o que se deve ao facto de o aumento do ângulo de contacto entre o grout e os poros, ter tido êxito nesta zona do provete.

Relativamente aos traços com menor quantidade de silicone, o traço 1:6, foi incapaz de aumentar suficientemente o ângulo de contacto para fazer face às dificuldades apresentadas pelas partículas finas do meio poroso, resultando em resistências ao corte quase nulas. No que diz respeito ao traço 1:4, este teve um resultado médio de resistência ao corte sensivelmente entre os outros dois traços de maior e menor quantidade de silicone, embora exista alguma discrepância de valores nomeadamente na bolacha superior, obtendo um valor consideravelmente abaixo das restantes, o que indica uma injeção que não foi bem conseguida até ao topo.

Quadro 4.6 - Resultados dos ensaios de resistência ao corte – Material cerâmico de granulometria B.

Material cerâmico B - Resistência ao corte (MPa)				
Traço de silicone	Base	Meio	Topo	Média
1:6	0,164	0,523	0,217	0,301
1:4	0,292	0,604	0,303	0,400
1:2	0,393	0,568	0,609	0,523

No que diz respeito ao meio poroso B, este obtém, na sua generalidade, valores equivalentemente superiores aos do meio poroso A nos correspondentes traços de silicone. É de notar que mais uma vez o traço 1:2 de silicone, apresentou valores bastante aceitáveis, sendo que, neste caso, o topo foi a bolacha com melhor resistência ao corte, o que indica uma injeção de grande sucesso, decorrente do facto da dimensão dos espaços vazios ser superior aos da granulometria A.

Quadro 4.7 - Resultados dos ensaios de resistência ao corte – Material cerâmico de granulometria E.

Material cerâmico E - Resistência ao corte (MPa)				
Traço de silicone	Base	Meio	Topo	Média
1:6	0,466	0,879	0,254	0,533
1:4	0,257	0,803	0,633	0,564
1:2	0,687	0,692	0,718	0,699

Ao observar caso a caso os valores de resistências ao corte do meio poroso E, verifica-se que para o traço com menor quantidade de silicone obteve-se alguma discrepância de valores face à bolacha de topo. Tal ocorrência deve-se ao facto da solução de silicone não ser suficiente para aumentar o ângulo de contacto para que injeção tivesse êxito até à última bolacha do provete. Relativamente à solução 1:4, obtiveram-se valores bastante bons na bolacha do meio e na de topo. No entanto, na bolacha inferior não se conseguiu um resultado equivalente aos restantes, talvez

devido ao facto, mais uma vez, da pressão de injeção ter sido demasiado alta, não permitindo assim alcançar o tempo necessário para que o grout penetrasse nos poros de menor dimensão da bolacha inferior. Relativamente ao meio poroso com maior quantidade de silicone, não existiu qualquer tipo de problema de penetração do grout o que levou impreterivelmente a bons resultados de resistência ao corte, tendo-se conseguido atingir uma boa coesão das partículas do meio poroso com o grout e um bom imbricamento entre estas.

É interessante reparar que a granulometria A foi a mais afectada na resistência ao corte, ao estar, como já foi referido, a injectabilidade directamente relacionada com os valores de resistência. Por outro lado, ao contrário do que se poderia esperar, obtiveram-se melhores resultados quando o traço de silicone era superior, o que indica que o silicone não nos trás tantos problemas de adesividade entre partículas de meio poroso cerâmico como se poderia antecipar.

Amostras calcárias

Relativamente aos resultados de resistência ao corte das amostras calcárias, e considerando, em termos genéricos, os valores constantes dos quadros 4.8 a 4.10 pode-se observar melhores resultados na granulometria E face às restantes. Tal ocorrência, mais uma vez, decorre do facto do material calcário E ser composto por uma granulometria mais grosseira, situação esta que beneficiou a resistência ao corte.

Quadro 4.8 - Resultados dos ensaios de resistência ao corte – Material calcário de granulometria A.

Material calcário A - Resistência ao corte (MPa)				
Traço de silicone	Base	Meio	Topo	Média
1:6	0,626	0,050	0,000	0,225
1:4	0,334	0,177	0,050	0,187
1:2	0,467	0,185	0,102	0,251

No meio poroso de granulometria A, é interessante ver que a a média de resistência do menor traço de silicone está entre os restantes. Isto deve-se, provavelmente, ao facto de ter existido um bloqueio ao grout devido a uma menor dimensão de vazios e, bem assim, em virtude da menor quantidade de silicone não ter sido a suficiente para aumentar o ângulo de contacto, de modo a evitar aquele bloqueio, concentrando grande parte do grout na base do provete, o que acabou por proporcionar uma resistência acima da média para esta solução de silicone. Relativamente aos traços 1:4 e 1:2 da solução de silicone, é visível que o grout chegou até ao topo, tendo estes valores de resistências sido bastante baixos no traço 1:4 e ligeiramente superiores no traço 1:2. São igualmente visíveis as vantagens da maior quantidade de silicone sendo que o

traço 1:2 é aquele que apresenta melhores resistências em média e foi aquele em que o grout melhor atingiu o topo.

Quadro 4.9 - Resultados dos ensaios de resistência ao corte – Material calcário de granulometria B.

Material calcário B - Resistência ao corte (MPa)				
Traço de silicone	Base	Meio	Topo	Média
1:6	0,224	0,131	0,020	0,125
1:4	0,127	0,318	0,156	0,200
1:2	0,388	0,303	0,258	0,316

O mesmo que se observou na granulometria A, é verificado nesta, ou seja, as maiores resistências ao corte ocorrem no provete com maior quantidade de silicone, sendo que este também é aquele que apresenta maiores quantidades de grout na secção de topo estando a resistência ao corte intimamente ligada a este facto.

Quadro 4.10 - Resultados dos ensaios de resistência ao corte – Material calcário de granulometria E.

Material calcário E - Resistência ao corte (MPa)				
Traço de silicone	Base	Meio	Topo	Média
1:6	0,369	0,365	0,329	0,354
1:4	0,464	0,356	0,289	0,370
1:2	0,394	0,612	0,558	0,521

Relativamente ao meio poroso E, é interessante observar que este é aquele que melhores resistências apresenta. Sendo este aquele que obteve maiores quantidades de grout injectado devido à maior facilidade de percolação do grout, leva a crer, que a adesividade do grout perante um meio poroso pré-injectado com hidrófugo de superfície, é bastante aceitável ao contrário daquilo que se poderia esperar. Ao se considerar o que já foi referido anteriormente relativamente à turbulência sentida na base durante a fase de injeção, importa igualmente ter presente que a solução 1:2, é também a secção que apresenta menores resultados de resistência ao corte.

Amostrs cerâmicas vs calcárias

Para que se possa fazer uma comparação correcta de resistências ao corte, entre o material cerâmico e o material calcário, é importante relembrar as injectabilidades obtidas nestes provetes. De uma forma geral, verificou-se que as injectabilidades foram tanto maiores quanto mais

grosseira a sua granulometria e, no que concerne ao material, pode também adiantar-se que para a mesma granulometria os meios porosos calcários conseguiram valores superiores de injectabilidade.

Ao se considerar o que antecede, seria de esperar uma melhor resistência ao corte no material calcário, situação que, contudo, não ocorreu.

Relativamente à comparação meio poroso A, no traço 1:6 a injeção não se deu da melhor forma tanto num tipo de material como no outro, facto que é possível constatar pelos resultados de resistência bastante reduzidos na bolacha de topo. Neste caso concreto e numa injeção sem êxito, obtiveram-se melhores valores de resistência para o material calcário. No traço 1:4, embora a injeção não tenha sido um sucesso, obteve-se maior quantidade de grout na bolacha de topo (face ao traço anterior), tanto no material cerâmico como no calcário, o que se pode comprovar por melhores resultados de resistência mecânica. O que aconteceu no traço intermédio de silicone, tornou-se ainda mais evidente no de maior quantidade de silicone (1:6), ou seja, à medida que existe uma maior quantidade de solução de silicone, é favorecida a injectabilidade e, consequentemente, a resistência mecânica dos provetes.

No que diz respeito às granulometrias B e E, os resultados foram bastante semelhantes à granulometria A, sendo igualmente proporcionais face à quantidade de silicone injectada e dimensão da granulometria em causa.

Pode-se então afirmar que os resultados de resistência para o material cerâmico, são tanto melhores quanto melhor a amostra for injectada, conclusão estritamente decorrente do facto de este material apresentar melhores ligações entre o grout e as partículas do meio poroso. Estas ligações podem ser de dois tipos, físicas ou mecânicas, sendo originadas, nomeadamente, devido à absorção das partículas do agregado, onde os cristais provenientes das componentes hidratadas dão lugar a uma boa aderência entre o grout e as partículas do meio poroso; químicas, onde o agregado liberta iões que combinam com os iões provindos da hidratação do ligante que formam ligações por deposições dos componentes hidratados e epitáxicas que são formadas por constituintes hidratados do grout que formam cristais com continuidade entre as partículas de ligante e meio poroso (Coutinho, 1973). Outra razão pela qual o material cerâmico obtém melhores valores resulta do imbricamento das partículas constituintes do meio poroso, que beneficia a resistência ao corte face à carga de faca aplicada. Este imbricamento está naturalmente relacionado com a injectabilidade dos provetes e, bem assim, com a coesão entre as partículas do grout e do meio poroso.

4.2.5. Comparação entre ensaios de resistência mecânica

Tendo em vista a obtenção de resultados mais fidedignos, optou-se por se ensaiar aqueles que melhor haviam de injectar (Tipo E) para que assim se pudesse fazer uma comparação directa entre o ensaio de corte e o ensaio de tracção por compressão diametral.

Ambos os ensaios dependem da injectabilidade da amostra, isto é, se não existir grout suficiente nos provetes nos ensaios de resistência, tal insuficiência implica a obtenção de valores baixos. Por outro lado, se existir demasiada perda de água constituinte do grout, este não chegará ao topo dos provetes, situação esta que, a ocorrer, fará com que as resistências das bolachas superiores sejam bastante inferiores ou mesmo nulas.

No que concerne ao ensaio de tracção por compressão diametral, importa ter presente que o mesmo, para além da injectabilidade, depende igualmente da qualidade da ligação entre as partículas do grout ao meio poroso. Mesmo que uma injeccção seja um sucesso, se esta ligação não for qualitativamente boa, os resultados repercutir-se-ão nos ensaios de resistência à tracção por compressão diametral.

Em relação ao ensaio de corte, e para além do mesmo depender da qualidade da injeccção e ligação entre partículas de grout e o meio poroso, ele depende também do seu imbricamento. Este imbricamento entre as partículas permite ao provete resistir a uma superior carga de faca mesmo quando a ligação entre as mesmas não é a melhor.

Ao observar os resultados com o que foi referido anteriormente, constata-se que os resultados relativamente aos ensaios de corte são superiores aos respectivos ensaios de tracção por compressão diametral. Esta diferença é observada nos meios porosos calcários e de uma forma mais acentuada nas amostras cerâmicas. Como foi dito, isto pode ser explicado pelo imbricamento entre as partículas que beneficia a resistência face a uma carga de faca.

4.3. Avaliação da consolidação do grout com silicone em vários meios porosos

Neste subcapítulo será feita a análise de resultados de injectabilidade, tomografia ultrasónica e resistências mecânicas de meios porosos injectados com a nova suspensão de grout com silicone. Antes de se passar à análise desta temática, é importante relembrar o propósito deste capítulo. Como é sabido a presente dissertação tem como objectivo o estudo da alteração do ângulo de contacto com vista a ser possível injectar meios porosos, que sem essa alteração não eram passíveis de ser injectados, e a otimizar a injeccção de outros.

Na primeira fase da presente dissertação foi aplicado um tratamento com uma solução de hidrófugo de superfície através dos vários meios porosos, por forma a alterar o ângulo de contacto entre os seus poros e a suspensão, com vista a facilitar a sua futura injeccção. Neste subcapítulo

serão analisados os resultados de injeções realizadas com a solução do hidrófugo de superfície aplicado directamente na amassadura do grout.

Para a nova suspensão, numa primeira fase e tendo em vista a oportunidade de estudar as diferenças quantitativas entre os resultados futuros e os já obtidos no grout sem silicone, foram injectados alguns provetes com a solução de silicone de traço 1:6 relativamente à quantidade de água total da suspensão, mantendo todas as outras variáveis, inclusive a quantidade de superplastificante (1,2%).

Os resultados obtidos, que se terá a oportunidade de analisar mais adiante, não foram de todo os melhores, isto porque ao adicionar a solução de silicone na mistura do grout este sofre modificações relativamente às suas propriedades/reologia.

Para que esta técnica obtivesse resultados favoráveis de injectabilidade e resistências mecânicas, a suspensão foi alvo de um estudo por parte de Neno (2016) baseado tanto em ensaios inerentes ao estado fresco (Espalhamento, Cone de Marsh, Retenção de Água e Estabilidade) como no estado endurecido (Resistência à flexão, compressão e determinação da porosidade aberta). Esta análise foi feita com vista a aproximar as características reológicas da nova suspensão às do grout com 1,2% de superplastificante utilizado na primeira fase da campanha experimental.

Relativamente à nova suspensão foi decidido manter o traço 1:6 de silicone que já havia sido utilizado e aumentar apenas a quantidade de superplastificante, mantendo a razão água/ligante inalterada.

Dosagem óptima de superplastificante

Tendo sido considerada a dosagem óptima de superplastificante em 1,2% por estudos anteriores referentes à mistura de grout utilizada na primeira fase da campanha, é agora importante que se consiga perceber qual a quantidade óptima para a nova suspensão com silicone na sua constituição.

Através do aumento de superplastificante, consegue-se promover a dispersão dos finos da mistura, obtendo maior molhabilidade por parte das partículas de ligante, sendo mais água absorvida na superfície da partícula e, consequentemente, havendo menor quantidade de água livre da suspensão. Com uma menor quantidade de água livre, irá existir igualmente menor absorção de água por parte do meio poroso, significa isto que com o aumento do superplastificante para que se consiga atingir a sua dosagem óptima, a suspensão melhora a sua capacidade de retenção de água, melhorando igualmente o comportamento reológico e a sua injectabilidade. É também relevante evidenciar que com o aumento deste adjuvante é previsível uma redução da viscosidade plástica e da tensão de cedência, devido à dispersão das partículas.

Nesta nova mistura de grout com a adição do silicone as propriedades como a viscosidade e, por consequência, a trabalhabilidade/fluidez foram modificadas/afectadas, neste caso para pior, com consequências na capacidade de injeção da mistura. No entanto, como já explicado, este efeito pode ser atenuado/compensado com o incremento da quantidade de superplastificante.

Deste modo, Neno (2016), de forma a aproximar as propriedades fundamentais do grout no seu estado fresco, nomeadamente, em termos da sua trabalhabilidade/fluidez, estabilidade e capacidade de retenção de água, optou por incrementar sucessivamente e de forma iterativa, a percentagem de superplastificante a introduzir neste inovador tipo de mistura, com o objectivo de otimizar a concepção da suspensão de modo a potenciar o sucesso das futuras injeções analisadas nos subcapítulos seguintes. As dosagens de superplastificante estudadas para a suspensão com hidrófugo de superfície na sua constituição foram 1,2%, 1,6%, 2% e 3%, como se pode consultar nas figuras 4.3 a 4.6.

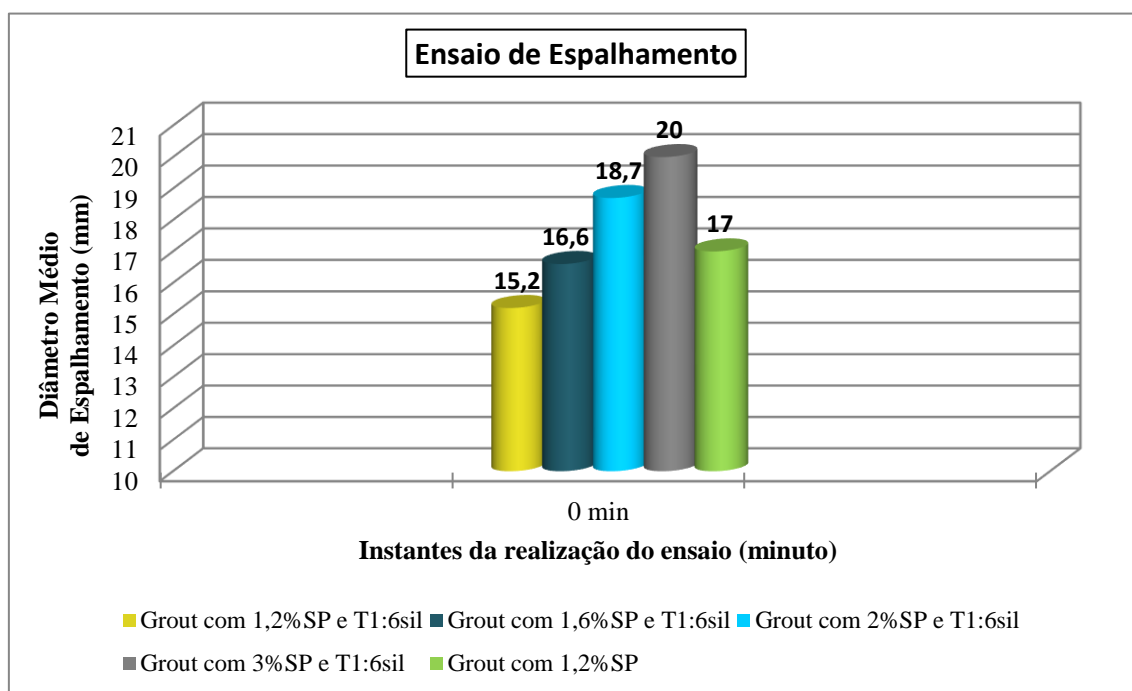


Figura 4.3 - Resultados do ensaio de espalhamento referentes a várias dosagens de superplastificante em grout com silicone na sua constituição em oposição ao grout sem silicone com 1,2% de SP (Neno, 2016).

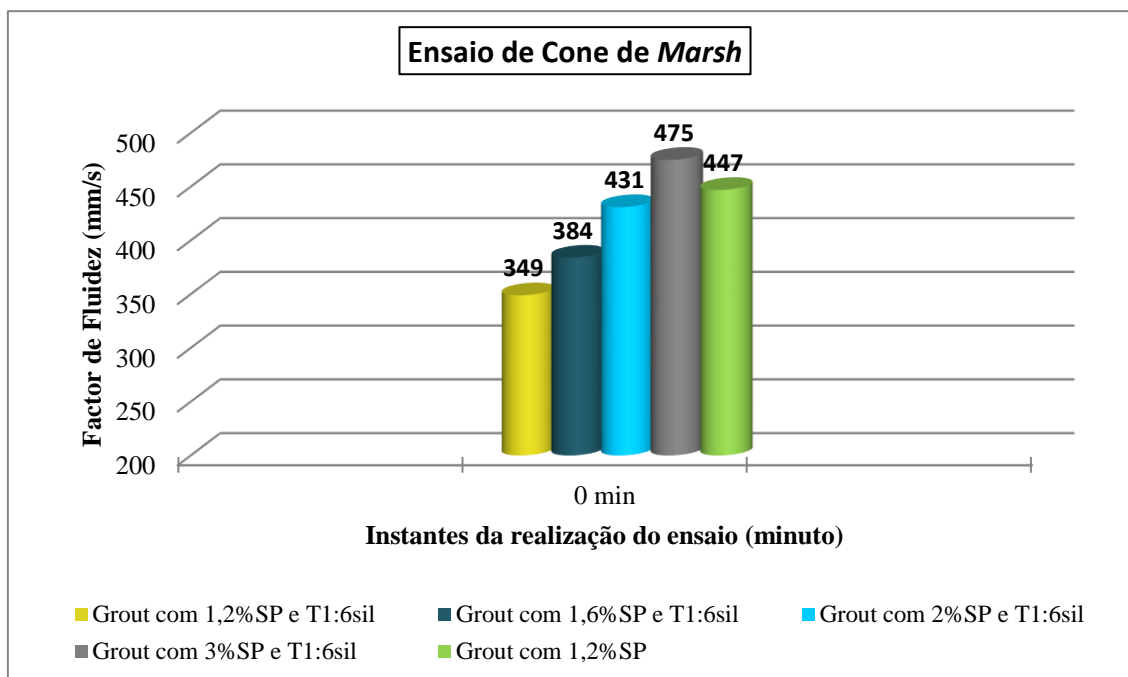


Figura 4.4 - Resultados do ensaio do cone de Marsh referentes a várias dosagens de superplastificante em grout com silicone na sua constituição em oposição ao grout sem silicone com 1,2% de SP (Neno, 2016).

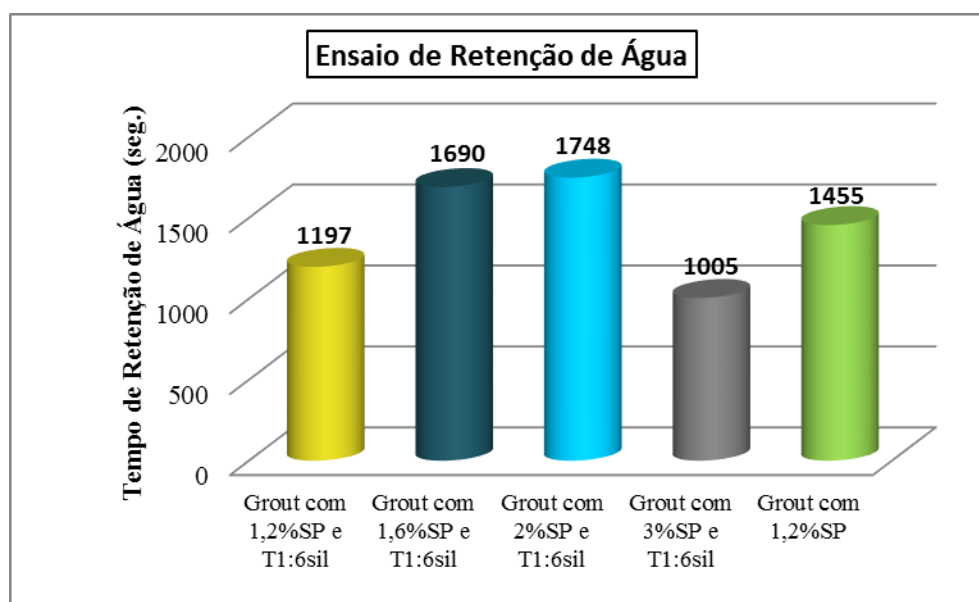


Figura 4.5 - Resultados do ensaio de retenção de água referentes a várias dosagens de SP em grout com silicone na sua constituição em oposição ao grout sem silicone com 1,2% de (Neno, 2016).

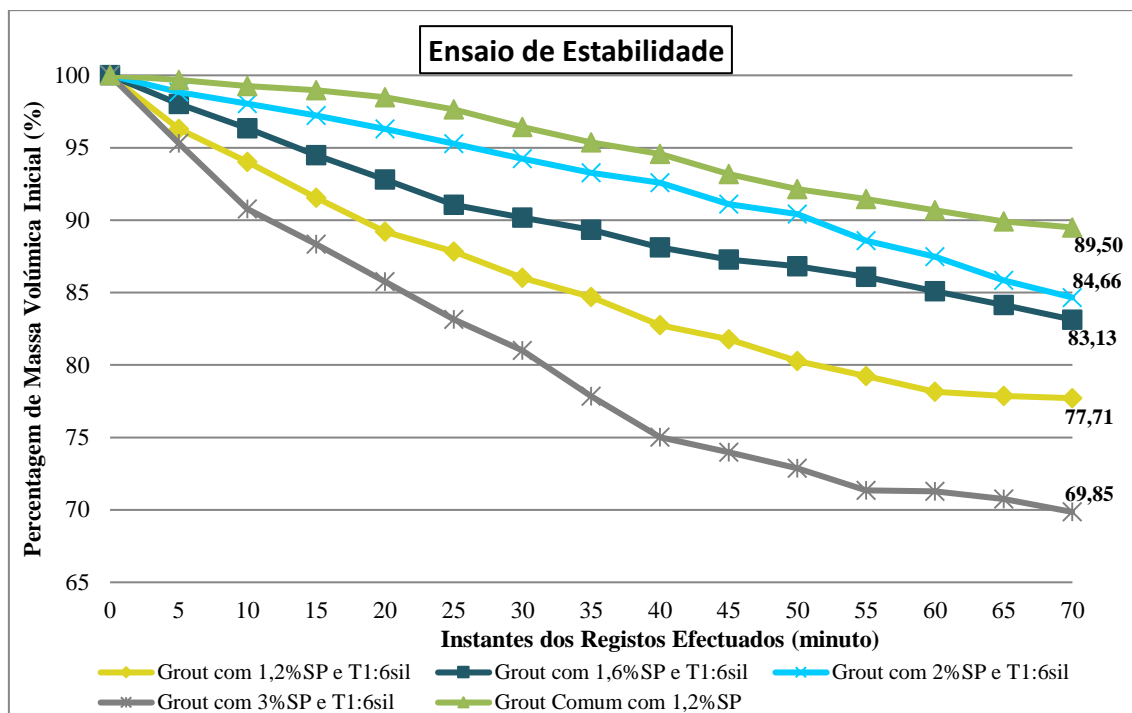


Figura 4.6 - Resultados do ensaio de estabilidade referentes a várias dosagens de SP em grout com silicone na sua constituição em oposição ao grout sem silicone com 1,2% de SP (Neno, 2016).

Através da análise destes gráficos, (Neno, 2016) pôde resumir como conclusões:

- Os grouts com silicone que se assemelham à trabalhabilidade e fluidez do grout comum usado para comparação (1,2% de SP) foram aqueles que apresentam uma dosagem de 1,6% e 2% de Superplastificante.
- Para os valores 1,6% e 2% de superplastificante não existem entraves a nível da estabilidade e capacidade de retenção de água destas misturas, apresentando esta última propriedade valores ligeiramente superiores relativamente à mistura sem silicone.

De forma a ser possível realizar os ensaios no tempo previsto, optou-se pelas injeções no meio poroso cerâmico em detrimento do meio poroso calcário visto que este apresentou maiores dificuldades à penetração do grout relacionados com a sua maior absorção de água livre da suspensão.

4.3.1. Ensaio de injeção

Este subcapítulo tem como objectivo estudar o que a variação da quantidade de superplastificante afecta a injectabilidade da suspensão de grout para que seja possível perceber qual a dosagem óptima, entre o intervalo obtido no estudo de Neno (2016) (1,6% - 2%).

Quadro 4.11 - Resultados do ensaio de injectabilidade para os meios porosos A, B e E injectados com grout com silicone na sua constituição.

Material cerâmico A	
Superplastificante (%)	Injectabilidade
1,20%	0,32
1,60%	0,54
2,00%	0,68
Material cerâmico B	
Superplastificante (%)	Injectabilidade
1,20%	0,37
1,60%	0,63
2,00%	0,72
Material cerâmico E	
Superplastificante (%)	Injectabilidade
1,20%	0,56
1,60%	0,92
2,00%	0,98

Como é possível observar, em todos os tipos de meio poroso injectados, (A, B e E) a injectabilidade aumentou de acordo com o incremento da quantidade de superplastificante.

Os baixos valores referentes à menor percentagem de superplastificantes, são explicados pela própria adição da solução de silicone na suspensão, tornando-a menos fluida e com menor trabalhabilidade. Através do auxílio do superplastificante, com o seu incremento foi possível modificar as propriedades do sistema água/ligante, sendo que, neste caso, não alterando a quantidade de água, conseguiu-se aumentar a fluidez da suspensão e a sua capacidade de retenção da água livre do grout e, conseqüentemente, melhorar a injectabilidade, como se consegue comprovar nos ensaios de 1,6% e 2%.

No que diz respeito a este ensaio e através dos resultados obtidos, desde o meio poroso mais grosseiro (E) ao mais complicado de se injectar (A), é possível comprovar o seu êxito, resultante do aumento do superplastificante.

Contudo, o resultado onde a sua percentagem é mais elevada, embora leve a injectabilidades superiores, pode contribuir para fenómenos de instabilidade e retracção no tempo de cura. Em face do que antecede, pode concluir-se que embora seja importante aumentar a fluidez do grout para que se obtenham boas injectabilidades, não devem igualmente ser ignoradas as conseqüências que tal situação pode acarretar. Esta questão será analisada de seguida através dos ensaios de grout endurecido.

É importante referir que apesar da maior capacidade de retenção de água do grout devido às maiores dosagens de superplastificante e ao aumento do ângulo de contacto através da utilização do silicone, o grout continua a apresentar algumas dificuldades em penetrar os poros de menor dimensão, nomeadamente, no meio poroso A.

4.3.2. Tomogramas ultra-sónicos

Estão representados na figura 4.7 os tomogramas relativos às amostras cerâmicas injectadas com a solução de silicone directamente na amassadura do grout. Como foi explicado anteriormente, aumentou-se o superplastificante para se obter um grout com propriedades semelhantes ao grout sem silicone. Devido aos fracos resultados de injectabilidade para 1,2% de superplastificante foi decidido apenas analisar a tomografia referente às restantes dosagens de 1,6% e 2%.

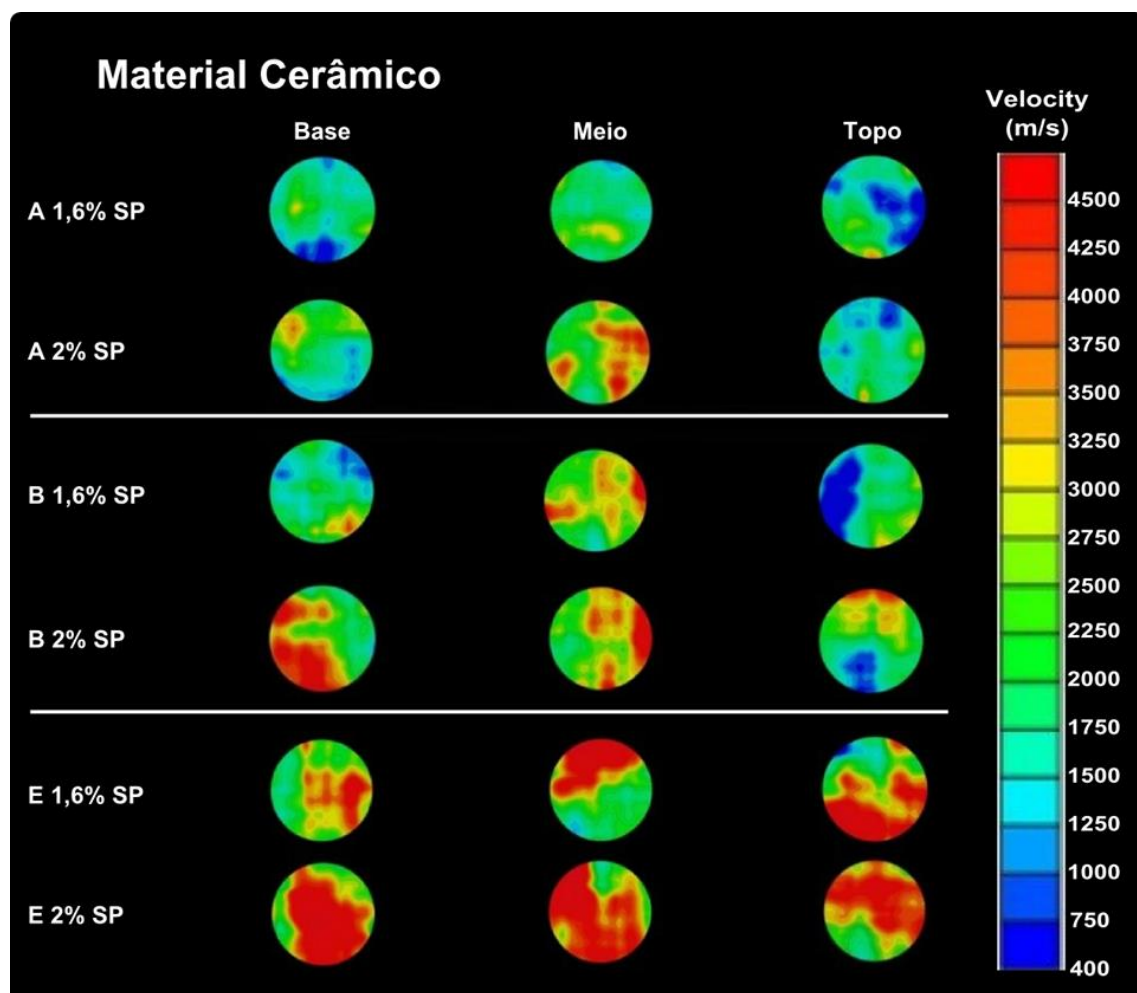


Figura 4.7 - Tomogramas ultra-sónicos referentes às injeções de grout com silicone em meios porosos cerâmicos A, B e E com 1,6% e 2% de Superplastificante.

Relativamente à granulometria A é notável o facto de apenas aparecer em quantidade considerável de tonalidade azul escura (velocidades de ultra-sons na ordem dos 500m/s) na secção de topo referente ao provete de 1,6% de superplastificante. Os provetes relativos às duas quantidades de superplastificante apresentam tendências de variação de ultra-sons semelhantes, sendo positivas nas passagens base-meio e negativas nas passagens meio-topo. Tal ocorrência é resultante da turbulência na base, bem como, ao efeito de sucção da água livre do grout do material cerâmico, diminuindo o teor água ligante da suspensão da base para o meio, ficando esta tendencialmente mais compacta, sendo que a ultima bolacha acaba por ficar mais compacta do que o esperado (por vezes até mais que a própria base). À medida que esta água é absorvida na secção central, acaba por provocar problemas de percolação do grout para a passagem meio-topo, acabando por não chegar tanto grout à secção de topo como nas restantes e, assim, prejudicar a sua compacidade. Ainda assim foram registados valores na ordem dos 2250 m/s nesta bolacha.

É possível registar uma leve melhoria no provete com maior quantidade de superplastificante, o que indicia que esta pequena diferença pode resultar numa leve melhoria da retenção de água da suspensão e, conseqüentemente, mais grout injectado e melhor compacidade final.

Na granulometria B, de uma forma geral, é possível apontar imediatas melhorias face à A analisada previamente. Tal como já havia acontecido, obtiveram-se melhores resultados no provete com maior quantidade de superplastificante, no entanto, a variação de velocidades de ultra-sons não foi semelhante para ambas as percentagens. No caso de 1,6% houve uma variação positiva na passagem base meio e negativa na passagem meio topo. Na de maior percentagem houve uma variação negativa ao longo de toda a altura do provete. Através dos dados obtidos, pode-se concluir que existiu alguma perda de compacidade por turbulência na secção de base na dosagem de 1,6%, sendo que com 2% tal não aconteceu de uma forma tão significativa. São igualmente notáveis os valores de cerca de 4000 m/s atingidos na secção base e média do provete com mais superplastificante sendo que no topo, embora em pequena quantidade, também tenham sido captadas estas velocidades. Esta diferença de resultados na granulometria B pode dever-se a diversos factores incontroláveis na injeção e na preparação do meio poroso, no entanto, fica registado que com esta pequena diferença de quantidade de superplastificante (mais uma vez) os resultados são consideravelmente melhores em termos de compacidade.

Relativamente à granulometria E, é possível rapidamente verificar que é aquela que apresenta os melhores resultados, o que está de acordo com o que se tem vindo a analisar ao longo deste capítulo. São obtidas secções com grandes quantidades de velocidades ultra-sónicas bastante elevadas e de maior homogeneidade. Torna-se indubitável que a granulometria de maior porometria apresenta maior facilidade à percolação do grout e que a capacidade de sucção de água do meio poroso não consegue estancar essa percolação.

4.3.3. Ensaio de resistência à tracção por compressão diametral

Neste subcapítulo serão analisados os resultados referentes à resistência à tracção por compressão diametral. Devido ao elevado número de provetes que teriam de ser injectados para que fosse possível analisar estas e as resistências ao corte que se encontram no subcapítulo seguinte, optou-se por se analisar as granulometrias A e E e assim partir do princípio que os valores relativos à granulometria B se encontravam algures entre estas.

Quadro 4.12- Resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral relativamente aos meios porosos A e E injectados com grout com silicone e quantidades de superplastificante de 1,6% e 2%.

Material cerâmico A c/ 1,6% SP	
Localização da fatia	Resistência à tracção (MPa)
Base	0,223
Meio	0,237
Topo	0,095
Média	0,185
Material cerâmico A c/ 2% SP	
Localização da fatia	Resistência à tracção (MPa)
Base	0,252
Meio	0,294
Topo	0,227
Média	0,258
Material cerâmico E c/ 1,6% SP	
Localização da fatia	Resistência à tracção (MPa)
Base	0,385
Meio	0,531
Topo	0,413
Média	0,443
Material cerâmico E c/ 2% SP	
Localização da fatia	Resistência à tracção (MPa)
Base	0,371
Meio	0,611
Topo	0,575
Média	0,519

Em termos genéricos consegue-se afirmar que os resultados de injectabilidade estão directamente relacionados com os de resistência à tracção. O mesmo é dizer que com o sucessivo aumento da quantidade de superplastificante foi adquirida uma maior retenção de água por parte da mistura, proporcionando um melhor desempenho do grout, sendo possível injectar uma maior quantidade que contraria a tendência de sucção de água livre por parte do material cerâmico e possibilita assim uma maior resistência à tracção devido à melhor compactação do meio poroso.

Relativamente ao material cerâmico A com 1,6% de superplastificante, é perceptível que o topo apresenta um resultado bastante abaixo das restantes bolachas, o que indica que mesmo com esta percentagem de adjuvante, o grout apresenta dificuldades em penetrar nos poros de menor dimensão e continua a perder uma quantidade considerável de água livre da sua constituição. A ocorrência de tal situação, consequentemente, irá trazer fracas injectabilidades nas bolachas superiores e fracas resistências mecânicas, neste caso, fraca resistência à tracção por compressão diametral.

Para a mesma amostra cerâmica mas agora com 2% de superplastificante, é interessante observar que as resistências nas bolachas inferior e central se mantêm próximas dos resultados com menor percentagem. No entanto, com a maior dispersão dos finos da mistura e consequente menor absorção de água por parte do meio poroso, o resultado de resistência de tracção na fatia superior aumentou consideravelmente.

Ao observar o meio poroso E, é evidente a menor resistência na bolacha inferior quando comparada com as superiores para as duas percentagens de superplastificante. Este facto deverá estar relacionado com a turbulência na secção de base, que também existiu nas outras granulometrias, embora não fosse tão evidente. Os resultados com as diferentes dosagens de superplastificante na granulometria E demonstram as mesmas tendências, sendo que ambas as injeções chegaram ao topo dos provetes embora com algumas melhorias no caso de 2% de superplastificante.

4.3.4. Ensaio de resistência ao corte

Neste subcapítulo serão analisados os resultados relativos aos ensaios de resistência ao corte. Neste caso foi possível ter valores para as granulometrias A, B e E visto que se tinha um provete de granulometria B injectado e aproveitaram-se essas bolachas para este ensaio.

Quadro 4.13 - Resultados dos ensaios de resistência ao corte referentes à técnica que utiliza o silicone na constituição do grout

Material cerâmico A - Resistência ao corte (MPa)				
Superplastificante (%)	Base	Meio	Topo	Média
1,2	0,024	0	0	0,008
1,6	0,145	0,152	0,098	0,132
2	0,283	0,299	0,174	0,252
Material cerâmico B - Resistência ao corte (MPa)				
Superplastificante (%)	Base	Meio	Topo	Média
1,2	0,048	0	0	0,016
1,6	0,1834	0,248	0,137	0,189
2	0,2873	0,339	0,216	0,281
Material cerâmico E - Resistência ao corte (MPa)				
Superplastificante (%)	Base	Meio	Topo	Média
1,2	0,091	0	0	0,030
1,6	0,872	1,143	1,042	1,019
2	0,717	1,233	1,116	1,022

Numa primeira análise, comprova-se que relativamente aos ensaios com 1,2% (Meios porosos A, B e E) de superplastificante, onde as injectabilidades foram bastante deficientes, a falta de fluidez da suspensão tem implicações directas na sua resistência mecânica, neste caso, ao corte. Ao não obter qualquer valor de resistência ao corte das bolachas de meio e topo, comprova-se que estas não foram injectadas devido ao incremento de viscosidade criado pela introdução do silicone.

No que diz respeito às granulometrias A e B, é possível constatar que o aumento da fluidez de 1,6% de superplastificante para 2% trouxe grandes benefícios na sua resistência ao corte.

Nestes meios porosos houve uma maior distinção de valores de resistências face à granulometria E. Tal situação pode ser explicada pelo facto de serem os meios porosos de menor dimensão de poros e, conseqüentemente, menos passíveis de serem penetrados pelo grout. A maior fluidez do grout proporcionou melhor percolação e, naturalmente, uma melhor coesão e imbricamento, o que conduziu a uma melhor qualidade das ligações entre as partículas do meio poroso com a suspensão.

Algo que não passa despercebido são os resultados obtidos nos provetes de meio poroso E com 1,6% e 2% de superplastificante. O sucesso destes resultados mostra que as dúvidas que existiam sobre a eventual instabilidade e a retracção do grout no tempo de cura, não prejudicou a

resistência ao corte. Ao contrário do que se poderia esperar, os 2% de superplastificante não prejudicaram a adesividade das partículas de grout com o meio poroso, tendo-se conseguido um bom imbricamento entre elas que se traduziu no sucesso dos resultados.

4.4. Comparações finais entre as técnicas de aplicação de hidrófugo de superfície.

Este capítulo tem como objectivo a comparação das técnicas utilizadas nesta dissertação relativas à aplicação de hidrófugo de superfície (silicone) com o intuito de otimizar o aumento do ângulo de contacto entre o grout e a parede do poro.

Será feita a análise tendo como base os valores relativos às dosagens de silicone e superplastificante, respectivamente 1:2 e 2%, que melhor efeito tiveram nos ensaios anteriormente comentados.

É importante relembrar que foi utilizado apenas material cerâmico nas injecções referentes à técnica que utiliza silicone na constituição do grout. Esta escolha deveu-se ao facto deste meio poroso apresentar uma maior absorção da água livre da suspensão, que dificulta a sua percolação e injectabilidade por comparação com o material calcário.

4.4.1. Ensaios de injectabilidade

Neste subcapítulo encontra-se a comparação entre as duas técnicas de aplicação do hidrófugo de superfície bem como os valores retirados das dissertações (Telha, F., 2015) e (Rodrigues, F., 2015), que abordam esta questão sem qualquer aplicação de silicone quer no meio poroso quer no grout. Desta forma conseguiu-se ter uma melhor percepção das vantagens do aumento do ângulo de contacto. É importante referir que os provetes utilizados por (Telha, F., 2015) são idênticos aos da corrente dissertação e aqueles que (Rodrigues, F., 2015) utilizou não o são, embora se consiga retirar uma ordem de grandeza nas comparações, sendo precisamente esse o intuito dos valores serem colocados no quadro seguinte.

Quadro 4.14 Comparação dos resultados dos ensaios de injectabilidade referentes às duas técnicas de aplicação de hidrófugo e sem hidrófugo de superfície.

Cerâmico A	Injectabilidade
Silicone 1:2	0,72
Superplastificante 2%	0,68
s/ tratamento - Seco*	0,33
Cerâmico B	Injectabilidade
Silicone 1:2	0,76
Superplastificante 2%	0,72
s/ tratamento - Seco*	0,45
Cerâmico E	Injectabilidade
Silicone 1:2	0,93
Superplastificante 2%	0,98
s/ tratamento - Seco**	0,84
s/ tratamento - Pré-molhado**	0,92

*Resultados retirados de (Telha, F., 2015)

**Resultados retirados de (Rodrigues, F., 2015)

Ao observar os valores retirados das análises anteriores e ao comparar os mesmos, consegue-se concluir que com a ausência do tratamento do hidrófugo de superfície, as forças de atracção do fluído às paredes dos poros são superiores às forças de atracção entre o grout e o ar, assim o ângulo de contacto é menor que 90° tornando o material hidrófilo. Desta forma, sendo o grout molhante, existe sucção da água livre do grout, prejudicando a injectabilidade do mesmo. Através da equação de Young-Laplace, pode-se explicar a razão pela qual foram possíveis melhorias nas granulometrias mais grosseiras constituídas por uma maior quantidade de poros de dimensão superior implicando menor sucção, sendo possível ao grout uma melhor percolação.

Para os meios porosos A e B que não eram passíveis de ser injectados com grout sem qualquer tipo de tratamento, passaram a sê-lo através da introdução do silicone, quer seja pelo meio poroso ou directamente na amassadura da mistura. Desta forma as forças de atracção do fluído às paredes do poro tornam-se menores que as forças de atracção entre o fluído e o ar, não havendo assim fenómeno de sucção mas sim de repulsão por parte do meio poroso. Neste caso o ângulo de contacto entre o grout e a parede do poro torna-se superior a 90° tendo o grout um comportamento não molhante.

Relativamente à injectabilidade da suspensão no meio poroso de granulometria E sem qualquer tipo de tratamento de superfície é possível retirar uma ordem de grandeza através de

Rodrigues, F., (2015), onde o ensaio de injectabilidade foi realizado com provetes de outra forma e dimensões. Foi-lhe obtida uma injectabilidade de 0,84. Este valor é compatível com o que o Doutor Fernando Jorne determinou ao apelidar “Good” a injectabilidade do meio poroso E injectado com grout e sem qualquer tipo de tratamento (Jorne et al., 2012a). É interessante ver que com o aumento do ângulo de contacto até neste meio poroso foram obtidos melhores injectabilidades, embora neste caso, isto se possa dever às discrepâncias que existem nos provetes ensaiados nesta dissertação e na de Rodrigues, F., (2015).

Ao comparar os resultados das técnicas de aplicação de hidrófugo de superfície utilizadas na presente dissertação, é interessante reparar que para todas as granulometrias foram conseguidas injectabilidades semelhantes através das duas técnicas. Nas granulometrias A e B ligeiramente acima para a técnica da pré-injecção de silicone sendo que o contrário aconteceu para a granulometria E. Nesta ultima granulometria, estes resultados podem estar relacionados com o facto de neste caso haver maior retenção de água na mistura. Desta forma, com a presença de silicone e uma maior percentagem de superplastificante, promoveu-se uma maior dispersão dos finos e, consequentemente, uma menor quantidade de água livre na suspensão passível de ser absorvida pelo meio poroso face à outra técnica. Outra razão que poderá ser apontada, será a possibilidade de com esta técnica se conseguir atingir o meio poroso de uma forma mais homogénea com o hidrófugo de superfície, visto que quando este é aplicado de forma manual directamente no meio poroso, por mais cuidado que se possa ter, é bastante complicado que este fique espalhado de uma forma totalmente homogénea.

Ainda assim os resultados mostraram-se bastante próximos para as duas técnicas utilizadas, sendo importante comparar os resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica para que se possa perceber se o incremento de superplastificante vem prejudicar os mesmos

4.4.2. Ensaaios de tomografia ultra-sónica

Relativamente aos ensaios tomográficos foi decidido fazer-se uma comparação exclusivamente através da observação dos resultados gráficos retirados do programa GEOTOM e não dos valores numéricos referentes aos ensaios de ultra-sons, uma vez que através desta forma existe uma percepção mais real da compactação dos provetes injectados.

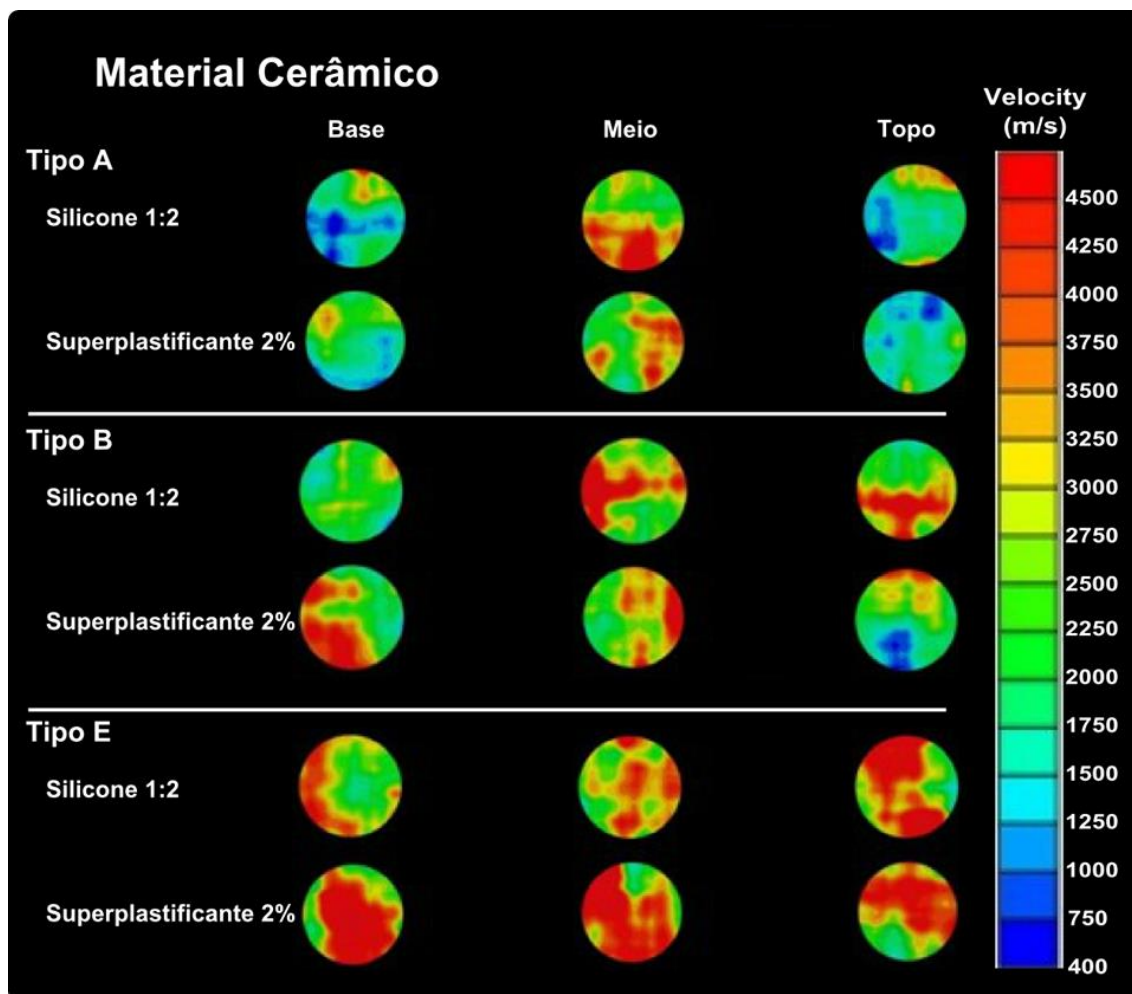


Figura 4.8 - Comparação da tomografia ultra-sónica face às duas técnicas de introdução de hidrófugo de superfície.

Em termos genéricos, dos provetes analisados para ambas as técnicas de aplicação distintas do hidrófugo de superfície, é possível verificar a existência de uma grande quantidade de tons avermelhados, o que leva a acreditar nos resultados dos ensaios de injectabilidade que apontavam para injeções de sucesso principalmente para a granulometria mais grosseira. Relativamente ao resultado final das compactações indicadas pelos tomogramas e no que diz respeito às duas técnicas, pode afirmar-se que procedendo a uma análise sob um prisma de velocidades médias globais, estas apresentam-se muito próximas, sendo que apenas ao analisar de uma forma mais minuciosa se torna possível notar as diferenças, mais concretamente, na forma como a suspensão se distribuiu e compactou os provetes em função da sua altura. Como já foi apontado nas análises anteriores, a granulometria do material constituinte do meio poroso bem como a dimensão dos espaços vazios que o compõem são um factor, ou mesmo, o factor determinante na injectabilidade e, consequentemente, nos resultados tomográficos representativos da compacidade dos provetes. Com isto, é possível observar uma crescente quantidade de tons indicativos de maiores velocidades ultra-sónicas à medida que o meio poroso se torna mais grosseiro. É sabido que foi injectado uma maior quantidade de grout, embora pequena, na técnica onde o silicone foi

introduzido na amassadura. Visto esta diferença ser pequena, é presumível que as médias de velocidades ultra-sónicas sejam também semelhantes, como se pode comprovar visualmente na figura 4.8, restando saber quais as diferenças de acumulação de grout nas várias secções dos provetes.

Ao observar os resultados dos tomogramas é possível notar alguma analogia entre os mesmos. Uma das semelhanças apresentadas para todas as granulometrias e técnicas de aplicação da solução de silicone em estudo, é o facto da secção média ser aquela que se apresenta sempre com uma maior compactação. Outra questão que se pode interiorizar é relativa à secção inferior dos provetes injectados com a solução prévia de silicone no meio poroso, que apresenta em todos os casos menores compactações face à outra técnica utilizada, indicando uma maior turbulência na secção de entrada. Relativamente aos topos, na secção A e E estes apresentaram-se bastante próximos, talvez com alguma vantagem para o grout com maior percentagem de superplastificante.

A maior compactação nas secções médias deverá estar relacionada com a turbulência sentida na secção de base durante a injeccção da suspensão, o que leva a que os valores de compactação desta secção baixem drasticamente. Ao ser a secção média algo afastada do local da injeccção e não sofrendo tanto o efeito da turbulência, torna-se naquela que apresenta melhores compactações, à semelhança das análises feitas anteriormente nesta dissertação.

Relativamente ao facto das secções de base apresentarem maiores velocidades ultra-sónicas quando injectadas com suspensões constituídas por 2% de superplastificante, sabendo-se de antemão que a trabalhabilidade e fluidez são semelhantes, pode estar associado à ligeira maior retenção de água desta mistura face à original, promovendo menos perda de água na base e, consequentemente, maior quantidade de grout, o que conduz a valores ultra-sónicos superiores.

4.4.3. Ensaios de resistência à tracção por compressão diametral e corte

Seguidamente apresenta-se a análise comparativa das resistências mecânicas tanto à tracção por compressão diametral como ao corte, relativamente às duas técnicas de introdução do hidrófugo de superfície utilizadas.

Como foi possível constatar nas duas últimas análises, através dos ensaios de injectabilidade e tomografia ultra-sónica, para as mesmas granulometrias de material cerâmico, o grout constituído por silicone apresentou uma ligeira maior quantidade de grout injectado nos provetes conduzindo-os a uma maior compactação, principalmente nas secções de base comprovada pela tomografia ultra-sónica.

Neste subcapítulo tem-se a oportunidade de analisar o comportamento dos provetes face aos ensaios destrutivos relativos às duas técnicas, sendo possível também tirar ilações da qualidade de ligação entre as misturas e o meio poroso, isto porque, a resistência mecânica como

já referido anteriormente, está intimamente ligada à injectabilidade bem como à qualidade de ligação grout/meio poroso.

Quadro 4.15 - Comparação dos resultados dos ensaios de resistência ao corte e tracção por compressão diametral referentes às duas técnicas de aplicação do hidrófugo de superfície

Resistência ao corte [MPa]				
Material cerâmico A	Base	Meio	Topo	Média
1:2 Silicone	0,349	0,674	0,350	0,458
2% Superplastificante	0,283	0,299	0,174	0,252
Material cerâmico B	Base	Meio	Topo	Média
1:2 Silicone	0,393	0,568	0,609	0,523
2% Superplastificante	0,287	0,339	0,216	0,281
Material cerâmico E	Base	Meio	Topo	Média
1:2 Silicone	0,687	0,692	0,718	0,699
2% Superplastificante	0,717	1,233	1,116	1,022
Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]				
Material cerâmico A	Base	Meio	Topo	Média
1:2 Silicone*	0,390	0,540	0,420	0,450
2% Superplastificante	0,252	0,294	0,227	0,258
Material cerâmico E	Base	Meio	Topo	Média
1:2 Silicone	0,413	0,523	0,341	0,426
2% Superplastificante	0,371	0,611	0,575	0,519

* Resultados retirados da Dissertação de Mestrado de Frederico Telha

Ao tomar em conta o que foi referido nas análises de resistências mecânicas anteriores e ao analisar o quadro 4.15, para granulometrias de maior dimensão de partículas constituintes do meio poroso, os valores de resistência mecânica são superiores independentemente da técnica utilizada para a aplicação do hidrófugo de superfície. Este facto estará relacionado, tal como já foi mencionado anteriormente, com a maior dimensão dos espaços vazios que resulta na maior quantidade de grout injectado e numa maior compactação. Por outro lado, no caso do ensaio de corte, acredita-se que o imbricamento de partículas de dimensão superior também tenha aqui um papel importante, sendo este positivo, podendo mesmo ser apontado como a possível razão da disparidade de valores entre o ensaio de tracção por compressão diametral e o de corte com um valor mais elevado. No que diz respeito à granulometria A, os resultados encontram-se bastante próximos não tendo o imbricamento tanta influência devido à menor dimensão de partículas.

Ao comparar as duas técnicas, relativamente aos dois ensaios, pode-se observar tendências semelhantes em ambos. Para a granulometria A e B a pré-solução de silicone no meio poroso mostrou-se vantajosa, no entanto para a granulometria E sucedeu o oposto. Antes de se tentar perceber o porquê, supõe-se que é possível afirmar que existe uma técnica apropriada para o meio poroso a injectar, não existindo assim uma técnica melhor que a outra em termos absolutos.

No que respeita aos resultados apresentados, para a granulometria A e B obtiveram-se valores superiores na técnica de aplicação do silicone directamente no meio poroso. É de relembrar que esta técnica apresentou indícios de uma melhor ligação grout/meio poroso. Relativamente à granulometria E, aconteceu o contrário. Pensa-se que poderá estar relacionado com as grandes quantidades de grout injectado nesta granulometria. Assim, a superior injectabilidade conseguida através da nova técnica, acaba por tomar um papel mais importante que a ligação grout/meio poroso da técnica que não apresenta grout na sua constituição.

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A corrente dissertação é composta por uma análise exaustiva de resultados que foram apresentados com uma determinada sequência. Começou-se pelo ensaio de injectabilidade, depois pela tomografia ultra-sónica e, finalmente, pelos ensaios de resistência mecânica. O resumo conclusivo que se segue terá também essa sequência para que haja um encadeamento lógico do que foi feito.

Relativamente à injectabilidade, provou-se que ambas as técnicas apresentaram resultados muito próximos para as granulometrias estudadas. Para os meios porosos A e B que não eram passíveis de ser injectadas sem tratamento de superfície, passam a sê-lo, para qualquer uma das técnicas estudadas nesta dissertação. O meio poroso de granulometria E, tanto para o material calcário, como para o cerâmico, apresentou, em ambas as técnicas estudadas, a maior quantidade de grout injectado, permitindo concluir que os factores mais relevantes para a injectabilidade, são o diâmetro das partículas constituintes do meio poroso e o vazio dos mesmos. Por fim, é igualmente possível concluir que o estudo realizado com vista a aproximar as propriedades do grout utilizado em estudos anteriores a esta nova suspensão com silicone, teve resultados compatíveis com os de injectabilidade da presente dissertação, sendo que para efeitos de injeção dos meios porosos A, B e E, aquela que continha uma quantidade de superplastificante de 2% se mostrou a mais indicada.

No que diz respeito à tomografia ultra-sónica, para ambas as técnicas notou-se alguma turbulência na fase de entrada do grout, o que foi comprovado pelas mais baixas velocidades ultra-sónicas na secção de base. Esta discrepância fez-se sentir mais na mistura sem silicone, onde a diferença de compactação da base para a secção central era superior. No que diz respeito à passagem das secções meio-topo, esta teve um gradiente negativo em ambas as técnicas que mostram aqui comportamentos semelhantes. É igualmente importante referir que para as granulometrias E principalmente para a nova técnica, foram conseguidas velocidades ultra-sónicas bastante elevadas que comprovam resultados óptimos de injectabilidade.

Relativamente aos ensaios de resistência mecânica, comprovou-se que a maior dimensão das partículas do meio poroso influencia directamente, pela positiva, os valores das mesmas. O ensaio de corte demonstrou ter valores ligeiramente acima do ensaio de tracção, excepto para a granulometria E onde foram obtidos valores com uma discrepância bastante superior. Estes resultados poderão estar relacionados com o facto do imbricamento das partículas de maior dimensão ter uma maior influência na resistência do provete.

Finalmente foi possível concluir que não existe uma técnica melhor para todas as granulometrias, sendo aquela que aplica o hidrófugo de superfície através do meio poroso a que obteve melhores resistências na granulometria A e B e a que o aplica directamente na amassadura, a que alcançou melhores resistências na granulometria E. Através destes resultados pode-se

entender que as ligações grout/meio poroso são melhores na técnica mais antiga, visto que também é esta que continha menos grout nos provetes. No entanto, quando existe bastante grout injectado nos provetes, como é o caso da granulometria E, este facto sobrepõe-se à qualidade das ligações, obtendo a nova técnica melhores resultados.

Depois de se obter diversas conclusões no âmbito desta dissertação, nomeadamente, que para ambas as técnicas de aplicação do silicone houve resultados positivos, serve de lançamento a **estudos e desenvolvimentos futuros**. Na técnica mais recente, visto ter-se utilizado sempre o mesmo traço de hidrófugo de superfície, seria interessante fazer novas injeções com outras dosagens. Por outro lado, para ambas as técnicas, poder-se-ia tentar melhorar a pressão de injeção, tendo em conta as variáveis grout e meio poroso, de forma a inverter a tendência de turbulência à entrada do grout. Por fim outra questão pertinente, novamente para ambas as técnicas, seria injectar novos meios porosos e granulometrias de forma a ter uma maior gama de resultados e assim atribuir a melhor técnica em função do local a injectar.

6. BIBLIOGRAFIA

Aiad, I. – Influence of time addition of superplasticizers on the rheological properties of fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research* 33 págs. 1229 – 1234, 2003.

Baltazar, L.; Henriques, F. – *Rheology of Grouts for Masonry Injection*. Key Engineering Materials, Volume 624, págs. 283-290, 2015.

Baltazar, L.; Henriques, F.; Cidade, M. – Contribution to the design of hydraulic lime-based grouts for masonry consolidation. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2015a.

Baltazar, L.; Henriques, F.; Jorne, F. – Optimisation of flow behavior and stability of superplasticized fresh hydraulic lime grouts through design of experiments. *Construction and Building Materials*, Volume 35, págs. 838-845, 2012b.

Baltazar, L.; Henriques, F.; Jorne, F.; Cidade, M. – *Combined effect of superplasticizer, silica fume and temperature in the performance of natural hydraulic lime grouts*. *Construction and Building Materials*, Volume 50, págs. 584-597, 2014.

Baltazar, L.; Henriques, F.; Jorne, F.; Cidade, M. – *Performance improvement of hydraulic lime based grouts for masonry consolidation: an experimental study*. 13th International Conference on Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture, New Forest, UK, 25th-27th June págs. 417-430, 2013b.

Baltazar, L.; Henriques, F.; Jorne, F.; Cidade, M. – The use of rheology in the study of the composition effects on the fresh behavior of hydraulic lime grouts for injection of masonry walls. *Rheologica Acta*, Volume 52, págs. 127-138, 2013a.

Binda, L.; Lualdi, M.; Saisi, A. – *Non-Destructive Testing Techniques Applied for Diagnostic Investigation: Syracuse Cathedral in Sicily, Italy*. *International Journal of Architectural Heritage*, Volume 1, págs. 380-402, 2007.

Binda, L.; Modena, C.; Baronio, G.; Abbaneo, S. – *Repair and investigation techniques for stone masonry walls*. *Construction and Building Materials*, Volume 11, págs. 133-142. 1997.

Binda, L.; Saisi, A.; Zanzi, L. – Sonic tomography and flat-jack tests as complementary investigation procedures for the stone pillars of the temple of S. Nicolò l'Arena (Italy). *NDT & E International*, Volume 36, págs. 2015-227, 2003.

Bjornstrom, J.; Chandra, S. – *Effect of superplasticizers on the rheological properties of cements*. *Materials and Structures*, Volume 36 págs. 685-692, 2003.

Bracco, G.; Holst, B. – *Contact Angle and Wetting Properties*. Springer Series in Surface Sciences, Volume 51, 2013.

Brás, A. – *Grout optimization for masonry consolidation*. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

Brás, A.; Henriques, F. – Natural hydraulic lime based grouts – The selection of grout injection parameters for masonry consolidation. *Construction and Building Materials*, Volume 26, págs. 135-144, 2012.

Buyukozturk, O. – *Imaging of concrete structures*. *Ndt & E International*, Volume 31 págs. 233-243, 1998.

Cantini, L.; Felicetti, R.; Zanzi, L.; Munda, S.; Meana, M.; Binda, L. – Sonic tomography applied to historic masonry structures: validation of the testing methodology and of the data elaboration by different computer codes. Proc 14th international conference – structural faults & repair, Scotland, 3rd-5th July, 2012.

Coelho, J. – *Avaliação da injeção de grouts em alvenarias antigas com ensaios não destrutivos*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.

Collepardi, M. – *Degradation and restoration of masonry walls of historical buildings*. Materials and Structures, Volume 23, págs. 81-102, 1990.

Concu, G.; De Nicollo, B.; Piga, C.; Popescu, V. – *Measurement system for non-destructive testing using ultrasonic tomography spectral attenuation*. 12th International conference on optimization of electrical and electronic equipment (OPTM), 20th-22th May. Págs. 1016-1020, 2010(a).

Concu, G.; De Nicollo, B.; Piga, C.; Popescu, V. – *Non Destructive Testing of Stone Masonry using Acoustic Attenuation Tomography Imaging*. 12th International conference on optimization of electrical and electronic equipment (OPTM), 20th-22th May, 2010b.

Correia, J. – *Avaliação da higroscopicidade de materiais correntes*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.

Coutinho, A. de S. - *Fabrico e propriedades do betão*. Volume II, 2006th ed. Lisboa: LNEC 1973.

Eklund, D.; Stille, H. – *Penetrability due to filtration tendency of cement-based grouts*. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 23, págs. 389-398, 2008.

Fernandéz-Altable, V.; Casanova, I. – Influence of mixing sequence and superplasticizer dosage on the rheological response of cement pastes at different temperatures. Cement and Concrete Research, Volume 36, págs. 1222-1230, 2006.

Flatt, R.; Houst, Y. – *A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers*. Cement and Concrete Reserch, Volume 31, págs. 1169-1176, 2001.

Golaszekwski, J. *Influence of cement properties on new generation superplasticizers performance*. Construction and Building Materials, Vol. 35 págs. 586-596. Elsevier, 2012.

Groen, J.; Peffer, L.; Perez-Ramirez, J. – *Microporous Mesoporous Materials*, pág. 60, 2003.

Hanehara, S.; Yamada, K. – *Rheology and early age properties of cement systems*. Cement and Concrete Reserch, Volume 38, págs. 175-195, 2008.

Heikal, M.; Aiad, I. – Influence of delaying addition time of superplasticizers on chemical process and properties of cement pastes, 2008.

Henriques, F. – *Comportamento Higrotérmico de Edifícios*. Lisboa, UNL – FCT, 2011.

Ignoul, S.; Van Rickstal, F.; Van Gemert, D. - *Application of mineral grouts. Case study and impact on structural behaviour: Church of St. Catharina at Duisburg (B)*. Structural Analysis of Historical Constructions, A.A. Balkema Publishers, Leiden, 2005.

IPQ. NP EN 934-2 – *Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção*. Parte 2: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e etiquetagem. Instituto Português da Qualidade, Monte da Caparica, 2009.

- Jorne, F. – Injectability of hydraulic lime grouts for old masonry consolidation. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2016
- Jorne, F.; Henriques, F. – *Study of hydraulic lime grout injections in different porous media: an experimental study*. WIT Transactions on The Built Environment, Volume 131, págs. 1743-3509, 2013.
- Jorne, F.; Henriques, F.; Baltazar, L. – *Evaluation of consolidation of grout injection with ultrasonic tomography*. Construction and Building Materials, Volume 66, págs. 494-506, 2014.
- Jorne, F.; Henriques, F.; Baltazar, L. – *Grout injection in porous media with different internal structures*. Proceedings of the 14th International Conference – Structural Faults & Repair, Scotland, 3rd – 5th July, 2012a.
- Jorne, F.; Henriques, F.; Baltazar, L. – *Injection capacity of hydraulic lime grouts in different porous media*. Materials and Structures, Volume 48, págs. 2211-2233, 2015b.
- Jorne, F.; Henriques, F.; Baltazar, L. – *Evaluation of consolidation of different porous media with hydraulic lime grout injection*. Journal of Cultural Heritage, Volume 16, págs. 438-451, 2015a.
- Kalagri, A.; Miltiadou-Fezans, A.; Miltiadou-Fezans, A.; Vintzileou, E. – *Design and evaluation of hydraulic lime grouts for the strengthening of stone masonry historic structures*. Materials and Structures, Volume 43, págs. 1135-1146, 2010.
- Martins, R.; Bombard, A. – Rheology of fresh cement paste with superplasticizer and nanosilica admixtures studied by response surface methodology. Materials and Structures, Volume 45, págs. 905-921, 2011.
- Matos, J. – *Efeito da temperatura no comportamento de caldas de injeção à base de cal hidráulica natural na presença de policarboxilato*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.
- Miltiadou-Fezans, A.; Tassios, T. – *Fluidity of hydraulic grouts for masonry strengthening*. Materials and Structures, Volume 45, págs. 1817 – 1828, 2012.
- Miltiadou-Fezans, A.; Tassios, T. – *Stability of hydraulic grouts for masonry strengthening*. Materials and structures, Volume 46, págs. 1631-1652, 2013.
- Neno, A. – *Optimização de injeção de grout no âmbito da sua formulação e modo de aplicação*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2016.
- Rato, V. – *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2006.
- Reda Taha, M.; Shrive, N. - The use of pozzolans to improve bond and bond strength, 2001
- Ribeiro, N., - Caldas de injeção cimentícias para bainhas de pré-esforço estudo da sua estabilidade. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- Rodrigues, F. – *Análise experimental da resistência ao corte do núcleo interior de alvenarias de pano múltiplo consolidadas com injeção de grouts*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2015.

Roussel, N.; Lemaître, A.; Flatt, R.; Coussot, P. – *Steady state flow of cement suspensions: A micromechanical state of art*. Cement and Concrete Research, Volume 40, págs. 77-84, 2010.

Telha, F. – *Análise da influência da alteração do ângulo de contacto na injectabilidade de grouts*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2015.

Toumbakari, E. - *Lime-pozzolan-cement grouts and their structural effects on composite masonry walls*. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, 2002.

Valluzzi, M. - Requirements for the choice of mortar and grouts for consolidation of three-leaf stone masonry walls. RILEM Workshop on Repair Mortars for Historic Masonry – Delft, 26 th – 28 th January, 2005

Valluzzi, M.; Porto, F.; Modena, C. – *Behavior and modeling for strengthened three-leaf stone masonry walls*. Materials and Structures, 2004.

Van Rickstal, F. – *Grout Injection of Masonry, scientific approach and modeling*. Doctoral Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2000.

Van Rickstal, F.; Toumbakari, E.; Ignoul, S.; Van Gemert, D. – *Development of mineral grouts for consolidation injection*. In Consolidation of Masonry, Ed. D. Van Gemert, Advances in Materials Science and Restoration. Págs. 61-70, 2003.

Vikan, H. - Rheology and reactivity of cementitious binders with plasticizers. Tese de Doutoramento. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Noruega, 2005

Vintzileou, E. – *Grouting of Three-Leaf Stone Masonry: Types of Grouts, Mechanical properties of Masonry before and after Grouting*. Structural Analysis of Historical Constructions, 2006.

Vintzileou, E. - Three-Leaf Masonry in Compression, Before and After Grouting: A Review of Literature. International Journal of Architectural Heritage, vol. 5, págs. 513-538, 2011